

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra elektrotechniky a automatizace



Řízení pracoviště indukčního ohřevu

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Miloslav Linda. Ph.D.

Autor práce: Michal Smetana

© 2018 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Michal Smetana

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Řízení pracoviště indukčního ohřevu

Název anglicky

Workplace controls induction heating

Cíle práce

Cílem práce je analýza a rozbor parametrů aplikace indukčního ohřevu. Předpokladem je návrh a realizace manipulátoru pro obsluhu indukčního ohřevu – cílem bude návrh systému, programování řízení části indukčního ohřevu a manipulátoru.

Metodika

Proveďte rozbor možností sestavení manipulátoru pro obsluhu indukční pece. Sestavte a naprogramujte kompletní systém automatické indukční pece.

Doporučený rozsah práce

45 stran, bez příloh

Klíčová slova

řízení, manipulace, indukční ohřev, programování

Doporučené zdroje informací

ČERNÝ, Václav. Indukční ohřev (1). Časopis Elektro. Praha: FCC PUBLIC, roč. 2002, č. 10, s. 56. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el100256.pdf>

KOŽENÝ, Jiří. Základy elektrotepelné techniky: Poznámky z přednášek. Západočeská univerzita Plzeň, 2011.

LANGER, Emil a Jiří KOŽENÝ. Elektrotepelná zařízení indukční. 1. vyd. Plzeň, 1982, 185 s.

RADA, Josef et al. Elektrotepelná technika. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985, 344 s.

REICHL, Jaroslav. Magnetické vlastnosti látek. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/295-magneticke-vlastnosti-latek>

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Miloslav Linda, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 12. 1. 2016

prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 20. 1. 2016

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 01. 03. 2018

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Řízení pracoviště indukčního ohřevu vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne 31. 3. 2018

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Miloslavu Lindovi, Ph.D. za cenné rady a čas věnovaný této bakalářské práci. Velké díky patří i Ing. Antonínu Podhrázkému, Ph.D. a Ondřeji Táborskému za pomoc při sestavování stroje a možnost realizace celého projektu. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za velkou podporu.

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací nízkonákladového portálového manipulátoru sloužícího pro pohyb a ovládání modulu indukčního ohřevu. Jedním z prvotních požadavků byla možnost provést pomocí triviální úpravy záměnu indukčního modulu za frézku, čímž bude stroj přestavěn na plně funkční hobby CNC stanici s možností ovládání ve třech osách.

Práce se skládá z několika částí. Literární rešerše seznámí čtenáře nejen s historií indukčního ohřevu, ale také zprostředkuje a stručně vysvětlí tuto technologii, popíše parametry ovlivňující funkci, vyjmenuje základní typy indukčních pecí a zmíní jejich praktické využití, zejména však pro průmyslové aplikace. Praktická část se krok za krokem věnuje stavbě stroje i s popisem různých možností pro sestavení a následnou ukázkou, které konkrétní technologie byly použity na jednotlivé součásti. Závěr práce dokládá funkčnost jednotlivých částí stroje.

Klíčová slova: Řízení, Manipulace, Indukční ohřev, Programování, Arduino

Workplace controls induction heating

Abstract

The submitted bachelor thesis deals with the design and realization of a low-cost portal manipulator for the movement and control of the induction heating module. One of the initial requirements was possibility to replace the induction module for the milling machine because of trivial modification, thus turning the machine into a fully functional hobby CNC station with three-axis control.

The work consists of several parts. The literature review introduces the reader not only to the history of induction heating but also mediates and briefly explains this technology, describes the parameters influencing the function, defines the basic types of induction furnaces and shows their practical applicability, especially for industrial applications. The practical part consists of the step by step construction of machines describing the various possibilities of assembly and the subsequent demonstration of the particular technologies used for individual components. The conclusion of the thesis demonstrates the functionality of the individual parts of the machine.

Keywords: Control, Manipulation, Induction heating, Programming, Arduino

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl práce.....	2
3	Metodika.....	3
4	Literární rešerše.....	4
4.1	Historie.....	4
4.2	Indukční ohřev	5
4.2.1	Princip funkce.....	6
4.2.2	Parametry ovlivňující účinnost.....	6
4.3	Indukční zařízení pro hloubkový ohřev	9
4.3.1	Indukční pece kanálkové	9
4.3.2	Indukční pece kelímkové.....	12
4.3.3	Indukční pece vakuové	12
4.3.4	Indukční zařízení prohřívací.....	13
4.4	Indukční zařízení pro povrchový ohřev	14
4.4.1	Indukční kalení	14
4.4.2	Indukční pájení	15
4.4.3	Indukční svařování	16
4.4.4	Ostatní využití	17
5	Praktická část.....	21
5.1	Konstrukce a mechanika manipulátoru.....	21
5.1.1	Konstrukční materiál	22
5.1.2	Převod pohonu.....	23
5.1.3	Lineární vedení	24
5.2	Řízení jednotlivých os manipulátoru	25
5.2.1	Krokové motory.....	25
5.2.2	Drivery krokových motorů	28
5.3	Elektronika na bázi Arduino	30
5.3.1	Vývojová deska Arduino	31
5.3.2	Moduly a shieldy rozšiřující funkci.....	32
5.3.3	Konkrétní soupis pro manipulátor	33
5.4	Bezpečnost a ochranné prvky	33
5.5	Elektrické schéma zapojení	34
5.5.1	Zapojení řídicí elektroniky	34
5.5.2	Zapojení elektroniky akčních členů.....	36
5.6	Softwarové vybavení	37
5.6.1	Program GRBL.....	37
5.6.2	Grafické rozhraní.....	38

5.6.3	G-kód.....	41
5.7	Modul pro indukční ohřev	42
5.7.1	Nízkonapěťový indukční modul.....	43
5.8	Modul pro frézování	43
6	Závěr	44
7	Seznam použitých zdrojů	46
8	Seznam obrázků, tabulek a příloh.....	50
9	Seznam zkratk a symbolů.....	52
10	Přílohy.....	53

1 Úvod

Práce je koncipována do dvou hlavních částí. Vzhledem k faktu, že práce pojednává o elektromagnetické indukci (literární rešerše), je první část věnována principu indukčního ohřevu a reálnému využití v praxi. Potřebná data ke zpracování literární rešerše jsou čerpána výhradně z odborné literatury, internetových zdrojů, akademických prací včetně odborných časopisů a elektronických publikací, zaměřených na danou problematiku.

Následující praktická část je tvořena za pomoci vlastních zkušeností nabitých odbornou praxí ve společnosti Rillfem s.r.o. Veškeré požadavky a zásadní rozhodnutí jsou konzultovány s panem Ing. Antonínem Podhrázkým, Ph.D. jenž zastupuje výše uvedenou společnost a zároveň je vlastníkem popisovaného manipulátoru. Je nutné ovšem podotknout, že tento manipulátor je sestavován pouze jako „proof of concept“, který má za úkol zjistit možnosti využití, a v případě úspěchu prošlapat cestu k sofistikovanějším a pokročilejším strojům. Z tohoto důvodu se mimo jiné klade důraz, na celkovou konečnou částku potřebnou na výrobu stroje, a tak je mimo jiné využito i zbytkových materiálů z předchozích staveb průmyslových strojů určených pro indukční ohřev.

2 Cíl práce

- 1) Analýza a rozbor parametrů aplikace indukčního ohřevu.
- 2) Návrh manipulátoru a systému pro obsluhu indukčního ohřevu.
- 3) Realizace stavby manipulátoru.
- 4) Programování řídicí části manipulátoru a indukčního ohřevu

3 Metodika

K pochopení dané problematiky bylo nutné nastudovat množství odborných publikací, na jejímž základě lze získat přehled o procesech vznikajících během elektromagnetické indukce. Je důležité zmínit a poukázat i na jednotlivé možnosti využití v různorodých aplikacích, jelikož každá z nich řeší rozdílné problémy a potřeby, jako například odlišné materiály a parametry. Následovaly tyto praktické operace:

- 1) návrh prototypu stroje;
- 2) sestavení stroje;
- 3) odzkoušení s přihlédnutím k parametrům jako rychlost;
- 4) SW kalibrace pohonných jednotek;
- 5) test indukčního modulu;
- 6) výsledné odzkoušení.

Po zdárném sestavení celého stroje a umístění veškerých komponent na konstrukci zbývá ověřit funkčnost. Je velice pravděpodobné, že budou potřeba úpravy či dodatečné kalibrace. V průběhu následného praktického využití sestaveného stroje se projeví potřeby na případné budoucí vylepšení nebo se ukáží nedostatky, se kterými nebylo při návrhu stroje uvažováno.

4 Literární rešerše

Literární rešerše se zabývá samotnou historií a událostmi, které výrazně ovlivnily objev a rozvoj elektromagnetické indukce. Následuje stručné vysvětlení principu technologie a popis náležitostí, potřebných pro správnou funkci. V závěru literární rešerše je uvedeno, jakými způsoby je technologie nejčastěji využívána v praxi.

4.1 Historie

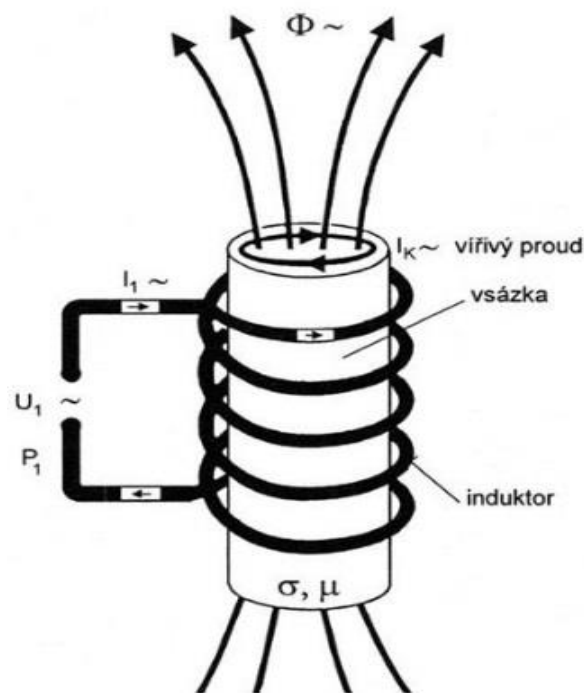
Téměř dvě století již uplynula od časů Michaela Faradaye (1831), který díky svému bádání objevil souvislosti mezi elektrickým a magnetickým polem. Na základě poznatků z tohoto bádání a experimentů následně popsal základy elektromagnetické indukce, jež se staly základním pilířem pro vznik indukčního ohřevu. Důležitým krokem k praktickému využití byla interpretace matematického aparátu pro elektromagnetické pole. Ta byla provedena J. C. Maxwellem, který sepsal čtyři rovnice dnes známé jako Maxwellovy. Touto interpretací již bylo vše připraveno pro následný rozvoj a pozdější využití v praxi. Vědci a inženýři před sebou ovšem měli nelehký cíl. Realizovat myšlenky do praxe a aplikovat dosud získané poznatky na sestavení historicky první indukční pece pro technické využití. [1]

Po uplynutí více než padesáti let (1887) Angličan de Ferranti sestrojil první indukční pec pro tavení. O tři roky později a po úpravách provedených F. A. Kjellinem byla do Švédského průmyslového závodu instalována zcela první kanálková pec. Počínaje tímto milníkem dochází k rozšiřování technologie do ocelářského a kovozpracujícího průmyslu po celém světě. Na území dnešní České republiky jako první zahajuje provoz indukční pec roku 1908 v Kladně. S postupným rozšiřováním pecí se začaly projevovat problémy s nedostatečnými parametry zdrojů pro napájení indukčních cívek. To se ovšem změnilo nástupem rotačních měničů. Tyto měniče umožnili zvýšení výkonu a změnu frekvenčního rozsahu pecí. Indukční ohřev se negativně zapsal do historie, a to díky výrobě vojenského arsenálu, čímž se nepřímo podílel na zločinech páchaných v období 2. světové války. Válečné procesy ovšem urychlily snahu vědců a koncem první poloviny 20. století se začaly pro napájení používat polovodičové frekvenční měniče. Tato změna vedla především ke snížení energetické náročnosti a zvýšení účinnosti celého procesu. Na základě technologických změn již nic nebránilo rozšíření do oblastí využití jako jsou například chemický, či automobilový průmysl, ale i masivnímu využívání v domácnostech pro přípravu pokrmů. [1]

4.2 Indukční ohřev

Indukční ohřev je proces na bázi elektromagnetické indukce, který se používá k lepení, vytvrzování nebo změkčení kovů či jiných vodivých materiálů. Pro mnoho moderních výrobních procesů nabízí právě indukční ohřev atraktivní kombinaci rychlosti, konzistence a vysoký stupeň kontroly. Při správném postupu navíc vzniká možnost využití opakované aplikace. [2]

Nyní si povíme, proč je tato metoda tak unikátní. Při nejběžněji používaných způsobech ohřevu je na kovovou součást aplikován hořák nebo otevřený plamen. To má za následek vysoké ztráty a s těmi je spojena i nižší účinnost. Při indukčním ohřevu je ovšem teplo v kovové součásti (vsázce) indukováno za pomoci cirkulujících (vířivých) elektrických proudů, tedy nikoli teplotním spádem jako u nepřímých ohřevů. Díky tomu je součást ohřívána napřímo a nevznikají v ní takové ztráty. [2; 3]



Obrázek 1 Směr vířivých proudů vůči magnetickému toku [17]

4.2.1 Princip funkce

Základní představa o principu ohřevu pomocí elektromagnetické indukce je následující. Induktor (vodič), jenž je napájen střídavým harmonickým proudem o frekvenci f (Hz) vytváří ve svém okolí proměnné elektromagnetické pole, jemuž je vystaven elektricky vodivý předmět (vsázka), u něž dochází k naindukování vířivých proudů, které mají takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického toku Φ (Wb), který ho vyvolal. Materiál vsázky je charakterizován rezistivitou ρ (Ω). Průchodem vířivých proudů, které mají směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického toku, který ho vyvolal, vznikají Jouleovy ztráty. Tyto ztráty jsou úměrné druhé mocnině elektivní hodnoty procházejícího proudu. Jednotlivé směry jsou viditelné na obrázku č. 1. Ve stěně vsázky dochází směrem k ose symetrie k postupnému útlumu elektromagnetického vlnění, což vede k poklesu množství tepla naindukovaného ve vsázce, jelikož je úměrné kvadrátu intenzity magnetického pole. Charakteristickým znakem indukčního ohřevu je fakt, že vsázka je nejteplejším místem celého technologického bloku (induktor-vsázka). Energie potřebná pro vznik tepla je přenášena elektromagnetickým polem, což znamená rychlejší, efektivnější a bezpečnější ohřev. [1]

4.2.2 Parametry ovlivňující účinnost

Účinnost indukčního systému pro ohřev libovolné součásti vždy závisí na několika aspektech. Například na samotné charakteristice dané součástí, tvaru induktoru, kapacitě napájecího zdroje a samozřejmě požadovaném rozsahu teplotního rozdílu.

Kovy vs. plasty

Indukční ohřev napřímo funguje pouze s feromagnetickými materiály, obvykle kovy. Plasty a jiné nevodivé materiály mohou být často nepřímo ohřívány, a to pomocí ohřevu tzv. „susceptoru“, který přenáší teplo na nevodivý materiál. [2]

Feromagnetické vs. neferomagnetické materiály

Je snadnější zahřívát feromagnetické materiály. Vedle tepla indukovaného vířivými proudy, feromagnetické materiály také produkují teplo skrze jev, který se nazývá hystereze. Tento účinek pomine při dosažení teploty „Curie“ – teplota, při které materiál ztrácí své feromagnetické vlastnosti. Vliv magnetického pole materiálů je ohodnocen na stupnici relativní permeability μ_r (od 100 Hm^{-1} do 500 Hm^{-1}), která vyjadřuje,

kolikrát je permeabilita daného materiálu vyšší nebo nižší než permeabilita vakua. Neferomagnetické materiály mají permeabilitu 1 Hm^{-1} a feromagnetické materiály mohou dosahovat permeability až 500 Hm^{-1} . [2]

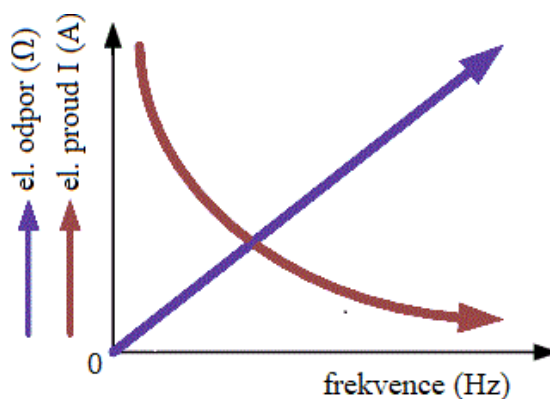
Tabulka 1 Currie teplota materiálů [22]

Látka	Curieova teplota T_c (°C)
Železo (Fe)	768
Kobalt (Co)	1130
Nikl (Ni)	358
Oxid železitý (Fe_2O_3)	622

Tlustostěnné vs. tenkostěnné materiály

U vodivých materiálů se přibližně 85 % ohřevu vyskytuje na povrchu materiálu. Intenzita ohřevu se snižuje s tím, jak se vzdálenost od povrchu zvyšuje. Indukční stroje na základě této vlastnosti disponují výměnnými induktory, které se volí dle velikosti a tvaru ohříváných součástí (vsázky). [2]

Vztah mezi frekvencí střídavého proudu a hloubkou proniknutí tepla: čím vyšší je frekvence, tím menší je ohřev součástí. Frekvence v rozmezí 100 kHz až 400 kHz vytvářejí poměrně vysokou energii, která je ideální pro rychlý ohřev malých součástí nebo povrchu větších součástí. Pro hluboký a pronikavý ohřev se ukázaly jako nejefektivnější delší ohřívací cykly při nižších frekvencích v rozmezí 5 kHz až 30 kHz. Na obrázku č. 2 lze vidět, jak stoupající frekvence ovlivňuje parametry indukčního ohřevu. [2]



Obrázek 2 Vliv frekvence na účinnost indukčního ohřevu

Rezistivita

Když se pokusíme pomocí indukce ohřát dvě součásti z ocele a mědi, které mimo použitého materiálu budou naprosto identické, dospějeme k odlišným výsledkům. Na vině je rezistivita. Ocel spolu s uhlíkem, cínem a wolframem mají vysokou rezistivitu (elektrický odpor). Jelikož tyto kovy silně odolávají proudu, snadno a rychle se vytváří teplo. Zatímco měď, mosaz a hliník, vyžadují delší ohřívání. Rezistivita se zvyšuje s teplotou, takže ohřátý kus oceli bude citlivější a indukční ohřev než studený kus. [2]

Tvar induktoru

V induktoru díky střídavému proudu vzniká proměnlivé magnetické pole, potřebné pro indukční ohřev. To znamená, že tvar induktoru je jedním z nejdůležitějších aspektů celého systému ohřevu. Dobře navržená cívka (induktor) zajišťuje správný průběh ohřevu a maximalizuje jeho účinnost. Současně zajišťuje snadné vkládání a vyjmutí předmětu do cívky. Návrh induktoru je závislý na požadavcích zákazníka. Musí však respektovat zásady výrobitelnosti a požadavky pro možnost přizpůsobení k předpokládanému generátoru. Různé tvary využívané v aplikacích lze vidět na obrázku č. 3. Induktor je většinou vyroben z měděné trubičky chlazené destilovanou vodou, která při ohřevu nevytváří usazeniny na vnitřní straně induktoru. [2]



Obrázek 3 Možné tvary induktorů [7]

Kapacita zdroje

Velikost napájecího zdroje potřebného pro indukční ohřev závisí na několika parametrech. Důležité je určit množství energie, kterou je potřeba přenést na ohřívanou součást. To mimo jiné závisí i na materiálu dané součásti, typu indukčního ohřevu a požadované teploty. Rovněž je třeba zvážit například ztráty tepla z vedení. [2]

Celkový rozsah teplotního rozdílu

Mezi poslední parametr ovlivňující účinnost indukčního ohřevu je celková výše teplotního rozdílu. Mohou být použity různé teplotní změny. Obecně platí pravidlo, že čím větší je požadovaný rozdíl, tím větší je potřeba dodávaného topného výkonu. [2]

4.3 Indukční zařízení pro hloubkový ohřev

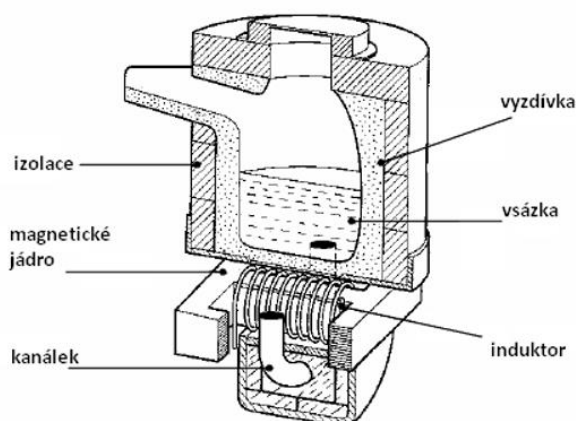
Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, při využití indukčního ohřevu vzniká teplo přímo v materiálu, jenž je předmětem ohřevu. Na základě této vlastnosti vznikají výhody jako jsou vysoká účinnost a rychlost ohřevu. Díky tomu se stal indukční ohřev nedílnou součástí širokého spektra průmyslové výroby po celém světě. Mezi hlavní oblasti použití patří strojírenství, hutnictví a slévárnictví, kde je využíván zejména pro tavení kovových i nekovových materiálů, žihání, prohřívání materiálů po tváření, kalení, svařování trubek, lepení, tavení skla, spojování a v dalších mnoha aplikacích. [1]

4.3.1 Indukční pece kanálkové

Indukční kanálkové pece se převážně používají jako pece udržovací, a to ve slévárnách litin a barevných kovů. Princip ohřevu kovu neumožňuje při výrobě oceli použít pece tohoto typu. Kanálkové pece se řadí mezi nejstarší elektrotepelné zařízení. Náklady na pořízení pece a její následný provoz jsou nižší než náklady na jiné typy indukčních pecí. Díky intenzivnímu promíchávání taveniny mohou kanálkové pece produkovat vysoce kvalitní kovy a slitiny. [12]

Kanálkové indukční pece s odkrytým kanálkem

Jedná se v podstatě o transformátor s uzavřeným jádrem pracujícím na řízené frekvenci 5 až 10 Hz. Uzavřený kanálek je vyplněn taveninou a tvoří závit spojený nakrátko. Kanálkové pece se používají pro tavení nízko-tavitelných a barevných kovů. Promíchání taveniny způsobuje vliv elektromagnetických sil, které působí v radiální rovině. Vlivem těchto sil není hladina taveniny vodorovná, ale šikmá s gradientem směřujícím k vnějšímu okraji. Na obrázku č. 4 je vyobrazen náčrt kanálkové pece. [12]

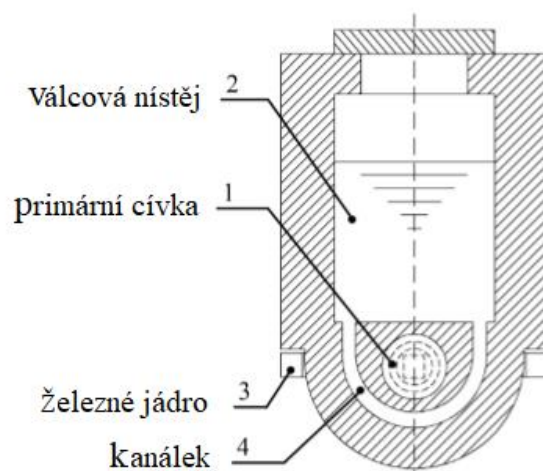


Obrázek 4 Popis uspořádání indukční kanálkové pece [1]

Během nepřiměřeného zvyšování příkonu pece může dojít k nežádoucím jevům, a to přerušeni prstence taveniny. V tom okamžiku přestávají působit elektrodynamické síly a tavenina se vrací do rovnovážného stavu. Pokud se tento jev opakuje, vznikají proudové rázy, díky kterým dochází k porušení řádného provozu pece. [13]

Kanálkové indukční pece se zakrytým kanálkem

Cívka, která je uložena pod kelímkem je obepnuta kanálkem, ve kterém se tavenina ohřívá. Vlivem elektromagnetických sil roztavený kov proudí z kanálku do taveniny, následně za pomoci hydrostatického tlaku natéká do kanálku kov nový. Tím je vsázka dostatečně promíchána. Kov v kanálku tvoří sekundární vinutí, primární vinutí může být součástí kanálkem, případně může být v jiné části magnetického obvodu. Změny magnetického toku v jádře indukují v kanálku intenzitu elektrického pole a následně proud. Průtok proudu roztaveným kovem vyvíjí v kovu činný výkon a kov ohřívá, případně, je-li cílem udržování kovu na zvolené teplotě, tento výkon hradí tepelné ztráty z horkého kovu do okolí. Kanálkovou pec je znázorněna na obrázku č. 5. [12]



Obrázek 5 Indukční pec se zakrytým kanálkem [29]

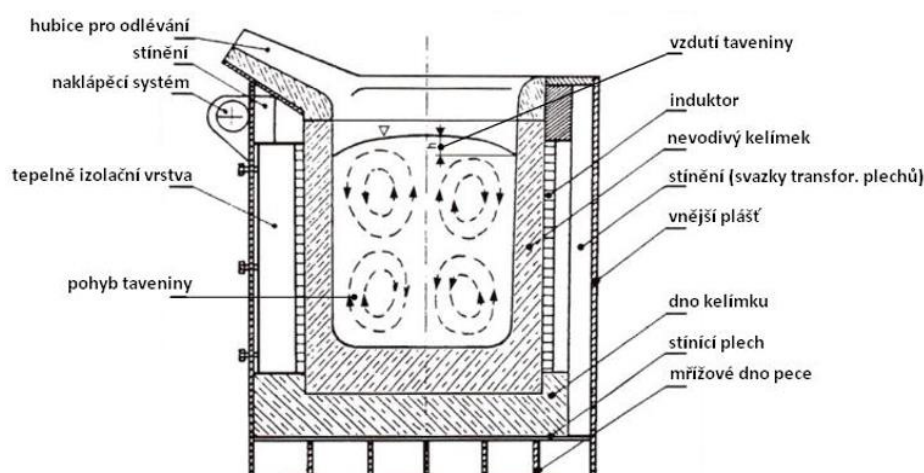
Jejich použití bývá zejména v průmyslu na zpracování hliníku. Mezi hlavní přednosti patří malý propal a celková účinnost, která dosahuje až 85 %. Pece jsou téměř nehlučné a pracují na síťové frekvenci (50 Hz). [12]

Nevýhodou je složitá konstrukce vyzdívky mezi induktorem a kanálkem. Je kladen velký důraz na přesné dodržení technologických postupů, neboť je vyzdívka náchylná k porušení a stav kanálku je prakticky nezjistitelný. Pece by měly pracovat nepřetržitě, aby kov zůstal neustále tekutý. Při zamrznutí kovu a jeho následném roztavení, se výrazně snižuje životnost vyzdívky. Stejný problém vzniká při úplném vylití a následném znovu naplnění kotlíku taveninou (po vychladnutí pece). Každé nové ohřátí z vychladnut pece je rizikovou operací. Pece je nutno navrhovat s ohledem na čištění kanálku, který zarůstá usazeninami. [12]

Nejpoužívanějšími indukčními pecemi jsou pece středofrekvenční. Konkrétně u tohoto typu je největším metalurgickým problémem volba výdusku pece pro vhodné použití s taveným materiálem. [12]

4.3.2 Indukční pece kelímkové

Na obr. 6 je zjednodušeně znázorněna kelímková indukční pec, používaná převážně pro tavení oceli. Na vnější straně keramického kelímku se nachází vodou chlazený induktor, který je napájen ze zdroje střídavého proudu o frekvenci v rozmezí 50 Hz až 1 kHz. Díky indukci vířivých proudů a působení elektromagnetických sil dochází uvnitř kelímku k intenzivnímu proudění taveného materiálu, což se projevuje kopulovitým vzduutím horní hladiny. Působením pohybu taveniny je zaručeno rovnoměrné promísění základní oceli s legovacími přísadami. [11]



Obrázek 6 Indukční pec kelímková [1]

Při napájení indukčních kelímkových pecí ze sítě o frekvenci 50 Hz je maximální měrný výkon omezen na hodnotu přibližující se k 300 kW na tunu taveniny. Při vyšších hodnotách výkonu by víření materiálu dosahovalo příliš intenzivní výšky kopulovité horní hladiny, což je nežádoucí. [11]

4.3.3 Indukční pece vakuové

Principy této metody spočívají v umístění tavícího kelímku společně s induktorem do vakuové komory. V této komoře probíhá jak tavení, tak i odlévání. Nízké hodnoty tlaku v tavícím prostoru umožňují zpracovávat litiny různorodého chemického složení železa, niklu, kobaltu a také prvky, které vykazují vysokou afinitu (schopnost tvořit chemickou sloučeninu) s kyslíkem jako jsou titan, měď, zirkon a jiné. Ve vakuových pecích nelze provádět tavbu slitin s vysokým obsahem manganu, který se v těchto podmínkách vypařuje. Výsledný produkt je homogenní a dosahuje vysoké

oxidické čistoty s minimálním obsahem plynů a nečistot s nízkým obsahem uhlíku. Použití vakuových pecí se nachází převážně v průmyslové výrobě pro ohřev vývalků, přířezů, ústřihů a dále pro průběžný ohřev tyčového materiálu, případně ohřev konců tyčového materiálu. Na obrázku č. 7 lze vidět fotografii popisovaného typu pece. [14; 15]



Obrázek 7 Indukční vakuová pec [18]

4.3.4 Indukční zařízení prohřívací

Důkladné prohřátí celého průřezu vývalku je důležitou podmínkou pro nedestruktivní zpracování materiálu, tj. tváření za tepla. Tvářením dochází ke změně geometrie materiálu, aniž by byla překročena jeho mez pevnosti. Mezi postupy při tváření patří např. kování, lisování, tažení či protlačování. Značnou výhodou indukčního prohřívání je rovnoměrnost prohřátí v celém objemu materiálu a jeho krátká doba ohřevu. Díky tomu nedochází k degradaci povrchu materiálu oxidací. Rovnoměrnost prohřátí znamená že rozdíl mezi teplotou na povrchu vývalku a jeho středem je minimální. Uvádí se, že rovnoměrnosti je dosaženo, pokud není rozdíl teplotách větší než 100 °C. Střed materiálu je ohříván vedením tepla z povrchové vrstvy. To zapříčiňuje časové zpoždění velikosti tepla v ose materiálu. S rostoucí povrchovou teplotou rostou i ztráty vyzařováním do okolí, což vede ke zpomalení růstu a snížení rozdílu teplot. [16; 17]

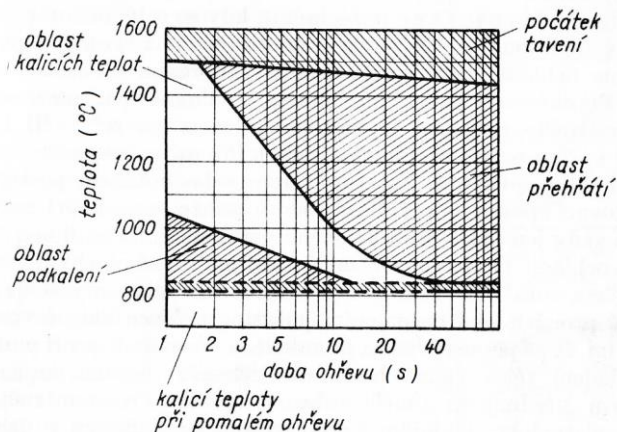
4.4 Indukční zařízení pro povrchový ohřev

Indukční ohřev je proces, jenž je využíván pro povrchový ohřev převážně ocelových dílů. Princip funkce spočívá v ohřátí daného materiálu do hloubky v řádech milimetrů, nikoli do celého objemu materiálu.

4.4.1 Indukční kalení

Kalení je způsob tepelného zpracování ocele, při kterém vzniká snaha o zlepšení mechanických a fyzikálních vlastností materiálu. Princip spočívá v rychlém a intenzivním ohřevu povrchové vrstvy dané součásti a jeho následném prudkém ochlazení tzv. kritickou rychlostí, čímž se potlačí vznik feritu a perlitu na úkor vzniku martenzitu a bainitu. Tím se dosáhne vyšší až maximální tvrdosti výrobku, ale dojde ke snížení jeho houževnatost, to znamená, že se materiál stává křehčím a náchylnějším k prasknutí při možném nárazu. Dochází také ke zvětšení objemu, což může vést k deformaci, pnutí, vzniku trhlin nebo až k prasknutí. Kalením vzniká velký teplotní spád směrem k ose materiálu, který vede ke vzniku ostrého přechodu z tvrdé na měkkou vrstvu, tj. řeč o sloupkovém jevu. Zakalená vrstva vykazuje vysokou tvrdost, ale není dobře spojena s jádrem a při zatížení dochází k jejímu odlupování. Tomu lze předejít zařazením přehřevu. [3; 4; 5]

Kalitelnost oceli je závislá na obsahu uhlíku. Uvádí se, že jako kalitelné jsou oceli s obsahem uhlíku vyšším než 0,35 %. Následné ochlazení oceli se provádí v prostředích jako jsou vodní lázně, vzduch, solná lázeň nebo minerální oleje, které mimo jiné minimalizují vnitřní pnutí. Jejich vlastnosti se liší rychlostí a intenzitou odvodu tepla. Následující obrázek č. 8 ukazuje oblasti kalících teplot. V praxi se povrchové kalení uplatňuje při výrobě klikových a vačkových hřídelů, ozubených kol. a nástrojových ocelí. [1]



Obrázek 8 Oblasti kalících teplot [6]

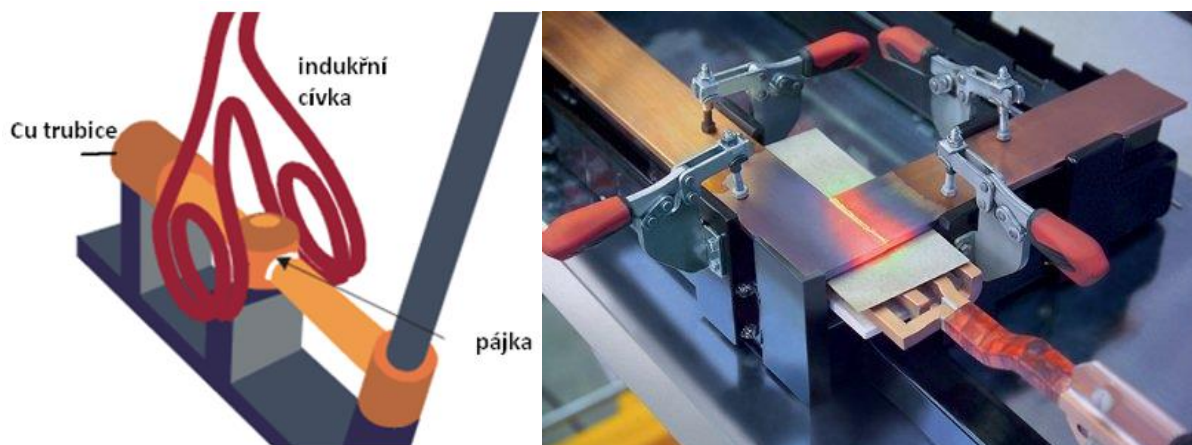
4.4.2 Indukční pájení

Pájením se rozumí spojení dvou a více materiálů prostřednictvím přidaného materiálu, pájky. Roztavením a difuzí pájky do základního materiálu vznikne rozebíratelný, elektricky vodivý spoj. Podle tavící teploty použité pájky lze rozdělit pájení na dva druhy: [1]

- pájení naměkko: teplota pájky dosahuje 450 °C;
cín, zinek, kadmium;
- pájení natvrdo: teplota nad 450 °C;
měď, stříbro, zlato, paladium.

Oproti klasickému pájení při tom indukčním nedochází k tepelné deformaci v okolí spoje, a to z důvodu, že indukční pájení je bezkontaktní. Tvar a rozměry induktoru (příklad uveden v obrázku č. 8) jsou voleny tak, aby induktor působil lokálně na pájený spoj a své okolí ovlivňoval, pokud možno co nejméně. [1]

Uplatnění nalezneme při spojování trubek (princip na obrázku č. 9) a přírub, vodičů, rozvodových trub, vinutí točivých i netočivých strojů, součástí automobilové karoserie, chladících soustav, palivových či hydraulických systémů nebo v leteckém průmyslu pro upevňování lopatek proudových motorů. [1; 8]

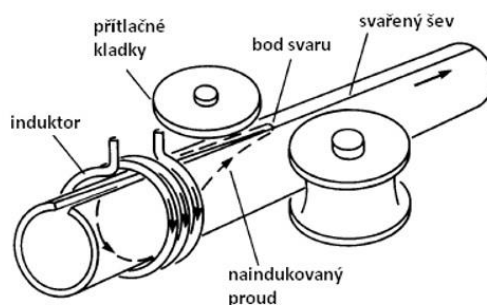


Obrázek 9 Nákres indukčního pájení a ukázka pájení měděných profilů [1; 8]

4.4.3 Indukční svařování

Indukční svařování je vhodné zejména u součástí, které vyžadují použití kontinuálního podélného svařování, a to převážně ve velkých sériích. Nejčastěji se však tento typ svařování aplikuje k podélnému svařování rour a trubek. Zmiňovanou metodou se hojně svařuje hliník a to i hliník legovaný manganem či magnéziem. [9]

Ocelový pás je za studena tažen přes kladky, kde je ohnut do tvaru trubky. Následuje indukční cívka, která je napájena proudem o určitém kmitočtu. Naindukované proudy se uzavírají v místě dotyku hran trubky, právě v tomto místě vlivem vysoké proudové hustoty vznikne dostatečná teplota (až 1400 °C) pro podélné svařování. Obecně platí, že se zvyšující se tloušťkou stěny trubky klesá rychlost svařování. Zmiňovaný princip indukčního svařování je popsán na obrázku č. 10. [4; 10]



Obrázek 10 Princip indukčního svařování [10]

Svařované ocelové trubky obvykle dosahují obsahu uhlíku do 0,1 %. Pokud je zmiňovaný obsah vyšší než například 0,3 %, může nastat nežádoucí prnutí v důsledku zakalení svaru. Při vzniku popisované situace nastává nutnost nechat svařovaný materiál dodatečně vyžít. Ke svařování ocelových materiálů jsou používány frekvence (kmitočty) v rozmezí 1 kHz až 10 kHz. Platí zde závislost frekvence na tloušťce stěny materiálu. Pokud je tloušťka stěny větší, musí být použity nižší kmitočty viz. tabulka č. 2. Důvodem je zajištění, aby došlo k prohřátí v celé svařované ploše. [9]

Tabulka 2 Doporučení kmitočty pro svařování ocelových trubek [9]

Kmitočet (Hz)	8 až 10	4	2	1
Tloušťka stěny (mm)	1,5 až 3,5	2,5 až 5,5	4,5 až 9	6,5 až 13

4.4.4 Ostatní využití

Indukční ohřev má v dnešní době téměř neomezenou možnost využití v široké škále průmyslových výroben až po malé výrobní závody. Mimo výše uvedených nejběžnějších využití indukčního ohřevu si nyní alespoň stručně popíšeme několik dalších významných aplikací.

Indukční žihání

Při použití indukčního žihání vzniká snaha o zmírnění vnitřního pnutí za pomoci modifikace struktury kovu. Vnitřní pnutí se vyskytuje především v okolí svarů, při kalení nebo tváření kovu. Technologický postup žihání spočívá v pomalém ohřevu na žihací teplotu (500 °C až 1200 °C), výdrži na této teplotě a následným pomalým chladnutím na vzduchu. Těmito procesy dojde k modifikaci struktury kovu, jež má za následek výše popsané vlastnosti. [1]

Indukční popouštění

Indukční popouštění je teplený proces, který se snaží optimalizovat mechanické vlastnosti zakaleného obrobku, jako jsou houževnatost a pružnost materiálu. Při popouštění se využívá pomalého ohřevu mezi 150 °C až 700 °C, výdrži na této teplotě po dlouhou dobu, což zajistí maximální houževnatost a následuje zchlazení. Také se někdy používá tzv. samo-popouštění, kdy jsou nástroje popouštěny zbytkovým teplem po neúplném ochlazení při kalení. Mezi oblast využití indukčního popouštění lze uvést například automobilový průmysl (hřídele, tyče, klouby a jiné) a výroba potrubí a trubek [1]

Getrování výbojek

Součástky jako jsou například výbojky, elektronky nebo obecně veškeré žárovky pro svoji správnou funkci vyžadují dokonalé vakuum. Vzniku vakua lze dosáhnout použitím tzv. getrování. Princip spočívá v nanesení aktivní látky zvané jako getr, která se při aktivaci chemicky váže na přebytečné atomy plynu na nosném prstenci z kovu vně baňky. Po uzavření baňky je výbojka umístěna do induktoru, kde působením elektromagnetického pole dochází k zahřátí nosného prstence, vypaření a následné aktivaci getru, který absorbuje zbytky plynu a tím vznikne dokonalé vakuum. Na povrchu baňky se vytvoří lesklý povlak, který má barvu v závislosti na použitém prvku (tantal, hořčík, baryum, titan, niob či fosfor). Na následujícím obrázku lze vidět porovnání výbojky před a po použití getrování. [29]



Obrázek 11 Getrování výbojek [29]

Přetavování drátu a trubek

Pro výrobu drátů a trubek je kladen důraz na kontinuální průběh v co nejdelších sériích. Následuje podélné rozdělení na kusy o definované délce. Lze samozřejmě aplikovat mechanické zakracování (stříhání), které ovšem vede ke vzniku odpadového materiálu a deformaci konců střiženého materiálu. Proto je v některých případech výhodnější použití technologii indukční ohřevu. Důležitým aspektem je zajištění rychlého a lokálního ohřevu, což vyžaduje velký měrný příkon induktoru, řádově desítky $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$. [1]

Indukční rovnání

Při tepelné úpravě či spojování materiálu vznikají nežádoucí deformace (nerovnosti). Tyto deformace lze odstranit provedením lokálního ohřevu předem definovaných topných zón. K vyrovnání nerovností vzniklých deformací dojde po vychladnutí ohřátých zón, a to díky zvýšenému vnitřnímu pnutí. Práce s metodou indukčního rovnání je oblíbená díky své rychlosti, lokálnosti, produktivitě a možnosti aplikace bez nutnosti odstranění okolních komponent. Nejběžněji indukční rovnání nachází uplatnění při rovnání ploch nosníků, svařování lodních palub a přepážek, při výrobě karoserií automobilů, výrobě kolejových a těžkých nákladních vozidel. Na obrázku č. 12 lze vidět stroj pro indukční rovnání. [1]



Obrázek 12 Indukční rovnání [19]

Indukční ohýbání

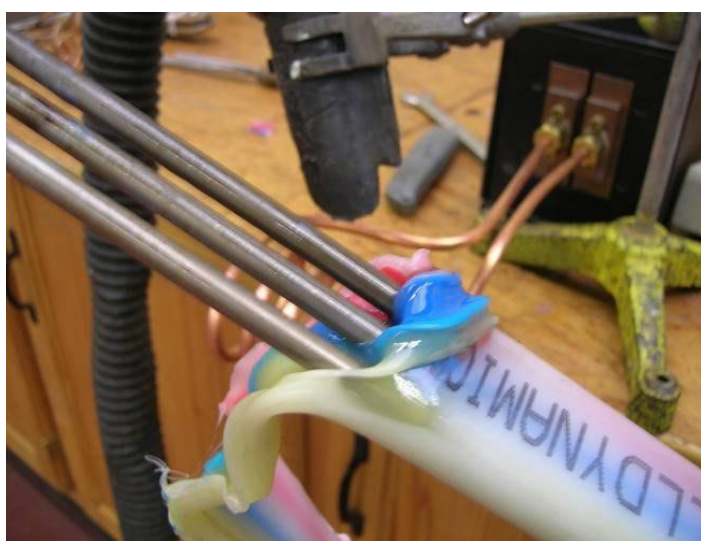
Ohýbání materiálů využitím indukčního ohřevu je hojně rozšířeno a využíváno především pro tvarování potrubních systémů, které jsou následně dodávány do jaderného, chemického, petrochemického a energetického průmyslu. Je umožněno provést ohýbání trubek o tloušťce až 100 mm s vnějším poloměrem přesahujícím více než 1000 mm. Proces začíná uchycením hrdla trubky do upínacího systému otočného ramene, následně je přiložen induktor vhodného průměru, jenž lze vidět na obrázku č. 13. Ohýbání součásti se provádí výhradně v úzkém pásmu, které se nachází v okolí místa, kde je obepnut induktorem kolem ohýbaného materiálu. V závislosti na ohýbaném materiálu lze potrubí chladit řízeným proudem vody nebo pomocí vzduchu. Aplikací indukčního ohýbání je výrazně snížen počet svárů v celkové konstrukci. [34; 35]



Obrázek 13 Indukční ohýbačka v praxi [21]

Tváření a lepení plastů

Rychlost, opakovatelnost nebo čistota práce jsou důvody, díky kterým je indukční ohřev využíván i v průmyslovém odvětví, které se zabývá zpracováním plastu. Indukčního ohřevu je zde využito např. při výrobě PET nádob, spojování plastových součástí, usazování součástí na kovové předměty jako jsou například čepele nožů, plastové povlaky nástrojů a rukojetí. Jedním z možných využití je také oddělování kovových částí zalitých do plastu, kaučuku či epoxidu a jejich následné zpracování. Odstranění plastu z povrchu kovového materiálu lze vidět na následujícím obrázku č. 14. [10; 36]



Obrázek 14 Odstranění plastu z povrchu kovu [20]

Závěrem kapitoly lze poznamenat, že spektrum uplatnění indukčního ohřevu napříč různými průmyslovými odvětvími je velmi široké. Ani zdaleka jsme nevyjmenovali veškeré hojně využívané způsoby využití. Jako další využití je vhodné zmínit sklářský průmysl, montáže součástí, plazmová technologie, indukční těsnění a samozřejmě indukční balení. Požadavkem dnešní doby je snaha minimalizovat náklady na výrobu při stoupajících cenách za energii a lidskou práci. Využitím indukčního ohřevu společně s automatizací výroby lze tohoto požadavku v rámci možností dosáhnout.

5 Praktická část

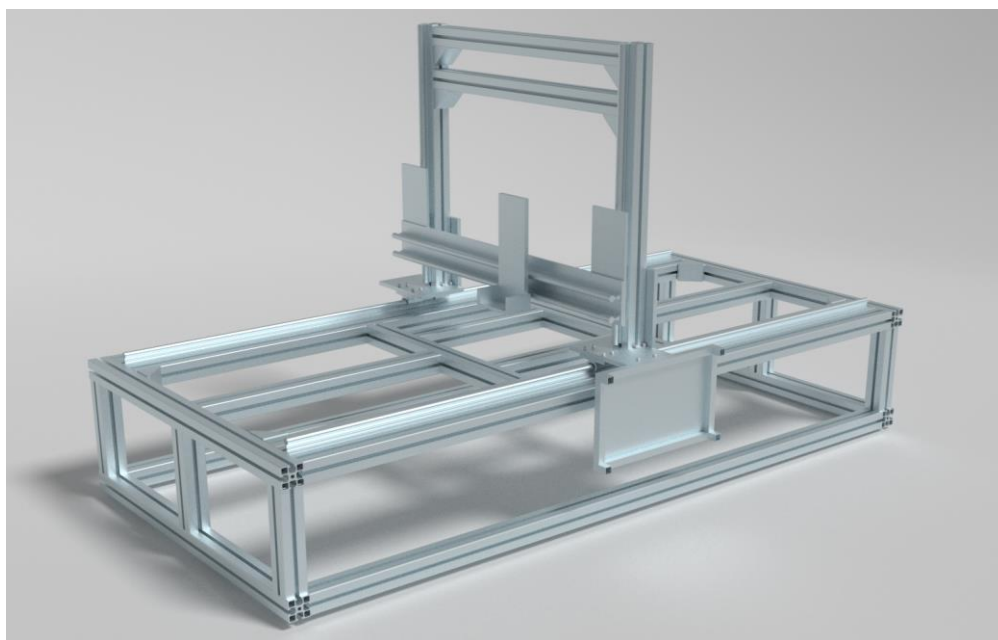
Praktická část bakalářské práce je zaměřena na stavbu posuvného manipulátoru pro indukční ohřev s možností záměny modulu pro ohřev za frézku. Zamýšlená pracovní plocha pro účely frézování má rozměry 90 mm x 125 mm. Najdeme zde i popis jednotlivých technologií použitých na stavbu stroje.

5.1 Konstrukce a mechanika manipulátoru

Konstrukce manipulátoru je naprosto zásadní věc při stavbě stroje. Před začátkem stavby jakéhokoli stroje je vždy třeba dobře promyslet samotnou konstrukci a dobře uvážit, jaké materiály na ni bude použit. Je velmi příhodné počítat i s budoucím vývojem, naddimenzováním a možnými úpravami či změnami, zvláště pokud se jedná o zkušební stroj. Estetika v tomto případě nehraje zásadní roli, jelikož se nejedná o stroj určený pro komerční účely. CAD návrh manipulátoru lze vidět na obrázku č. 15.

Prioritní požadavky na tento konkrétní manipulátor byly určeny ještě před samotným započítáním stavby. Následoval výběr technologií, jež budou použity pro stavbu a poté byly vybírány jednotlivé komponenty. Očekávané požadavky byly:

- tuhost konstrukce;
- zamezení vzniku radiálních vůlí při pohybu po ose Y;
- opakovatelná přesnost.



Obrázek 15 CAD návrh konstrukce manipulátoru

5.1.1 Konstrukční materiál

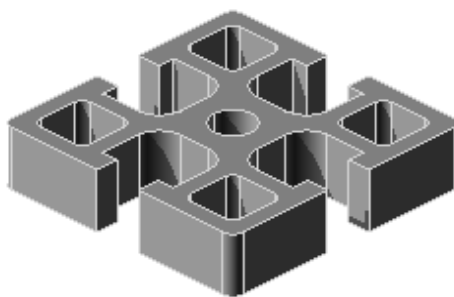
Alutec KK je společnost, která je jediným českým výrobcem hliníkových konstrukčních systémů. Společnost nabízí mnoho produktových řad hliníkových profilů pro různorodé aplikace i s možností návrhu a následné celkové realizace, a to i složitějších aplikací jako jsou kompletní dopravníkové systémy. Pro aplikaci byla zvolena nejzákladnější produktová řada ALS.

Produktová řada ALS

Produktová řada ALS je vlastní hliníkový konstrukční systém, jenž je nosnou částí pro ostatní výrobkové řady celé společnosti. Tento systém má velice přínosné výhody:

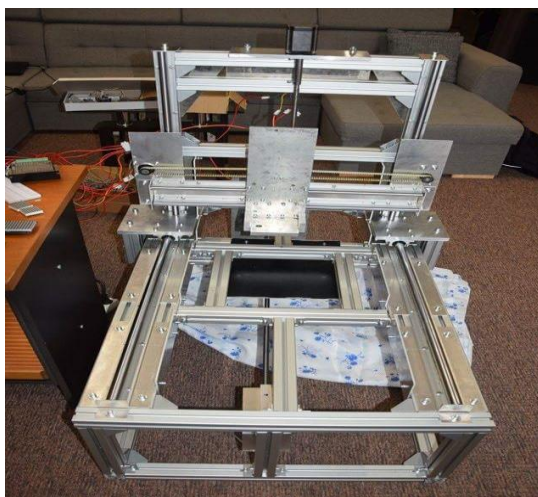
- rychlost práce se systémem;
- jednoduchost realizace zamýšleného celku;
- adaptabilita v rámci dalších řešení a nových nároků.

Tento konstrukční systém poskytuje rychlost a jednoduchost realizace s možností adaptability. Jakýkoli komponent může být připojen k ostatním, bez nutnosti zásahu do jeho konstrukce vrtáním či svařováním. Při použití standardních komponentů můžeme sestavit konstrukce strojů, ochranné rámy doplněné o krycí materiál, transportní systémy, linky pro účely montáží, řetězové či pásové dopravníky a manipulátory. [23]



Obrázek 16 Alutec profil 45 x 45 mm [39]

Pro potřeby manipulátoru byl zvolen profil 45x45 – 104545 z produktové řady ALS, který lze vidět na obrázku číslo 16. Pro spojení profilů bylo použito originálních úhelníků, které se pomocí šroubů připevní do speciálních matic, uzpůsobených drážkám v profilu. Transformace již nařezaných profilů do podoby tuhé konstrukce je otázkou několika minut, a to s možností opakovaného rozebírání spoje a případné úpravy rozměrů.



Obrázek 17 Konstrukce manipulátoru

Samotná nosná konstrukce na obrázku č. 17 byla vždy volně položena na podlaze z důvodu častého přesouvání, zkoušení a případných úprav. Na základě později provedených experimentů se ukázala nutnost vybavit konstrukci manipulátoru o anti-vibrační stojny, které jsou schopny díky gumovým podložkám absorbovat rázy vzniklé na krokových motorech (dále značeno KM), jež se přenáší do hliníkové konstrukce stroje. Díky výškové nastavitelnosti stojen lze docílit vyvážení pracovní plochy do vodorovné polohy i při umístění na nerovný povrch.

5.1.2 Převod pohonu

Převod rotačního pohybu na translační je možné realizovat pomocí způsobů uvedených v následující tabulce č. 3.

Tabulka 3 Přehled technologií převodu pohonu

Převod	Výhody	Nevýhody
Trapézový šroub s maticí	Vyvozená osová síla (2) Přesnost (2) Cena (1)	Osová rychlost (3) Ztráty (3) Potřeba mazání
Kuličkový šroub s maticí	Vyvozená osová síla (1) Přesnost (1) Ztráty (2)	Osové rychlosti (2) Potřeba mazání Cena (3)
Ozubený řemen	Cena (2) Ztráty (1) Tlumí vibrace a nárazy Rychlost posuvu (1) Netřeba mazat	Přenosová síla (3) Přesnost (3)

Legenda: Jednotlivé parametry zmiňované u veškerých uvedených způsobů jsou ohodnoceny známkami 1, 2 a 3 v porovnání mezi sebou. Číslo 1 znamená nejlepší, 2 průměrné a 3 nejhorší z uvedených.

Pro danou konkrétní aplikaci se jako dostatečná technologie ukázala kombinace dvou výše uvedených způsobů převodu pohonu od KM. Pro osu X, která má nejkratší vzdálenost, bylo využito převodu pomocí ozubeného řemene. Osa Y a osa Z byla realizována pomocí trapézového šroubu s maticí. Důvodem byl fakt, že osa Y, stejně tak jako osa Z musí být schopna přenášet větší zatížení vzniklé nosností konstrukce a případného materiálu na ní.

5.1.3 Lineární vedení

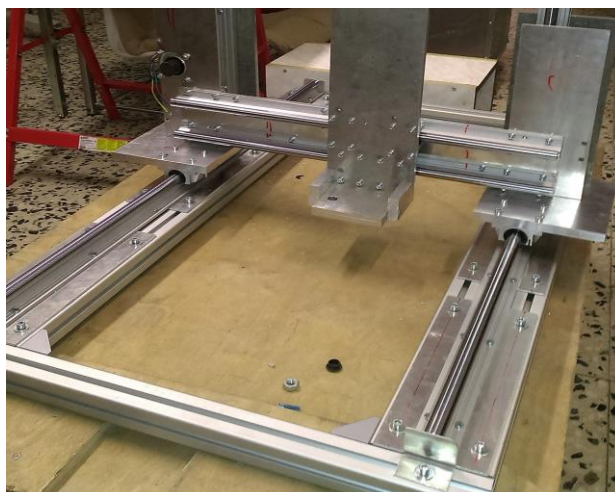
Termín lineární vedení se používá nejen pro samotný mechanický systém umožňující pohyb v předem nadefinovaném směru (kolejnice nebo kruhové tyče + vozík), tak pro celkové řešení pohybu (kombinace lineárního vedení + přenos pohonu). Obecně lze rozdělit řešení podle: [37]

A. tvaru kolejnic:

- kruhové tyče – jsou tyče z kalené nebo nerezové oceli, jsou broušeny na přesný rozměr z důvodu dosažení lepší drsnosti povrchu;
- profilové tyče – k dispozici jsou různorodá provedení závislá na výrobci;

B. způsobu pohybu vozíku po kolejnicích:

- kluzné – vozík smýká po kolejnici, cena výroby je mnohem nižší a při použití nově dostupných polymerů není zapotřebí mazání;
- kuličkové – mezi vozíkem a kolejnicí jsou v drážkách kuličky, provedení je dražší ale zaručuje vyšší přesnost a malé ztráty při pohybu.



Obrázek 18 Detail na lineární vedení pro osu Y v prvotní fázi stavby konstrukce

Pro veškeré osy byla zvolena kruhová tyč s kluzným způsobem pohybu po kolejnici. Toto řešení ovšem stejně tak, jako ostatní vyžaduje alespoň základní krytí od nečistot, které by mohly zapříčinit zvýšené tření a s tím spojené nadměrné opotřebovávání. Osazení osy Y lineárním vedením lze vidět na obrázku č. 18.

5.2 Řízení jednotlivých os manipulátoru

Volba krokového motoru má oproti servomotoru určité výhody, jmenovitě cenu. Díky dispozici třech skladových KM, které zbyly z demontáže starší hobby frézky s dřevěnou konstrukcí z masivu, nebylo nutné obstarat nové KM. Motory byly preventivně proměřeny a následně zkušebně zapojeny, načež jeví se jako funkční, a tak byly nainstalovány na konstrukci manipulátoru.

5.2.1 Krokové motory

Současná praxe v oblasti řídicí, měřicí, výpočetní a regulační techniky nejvíce využívá KM spolu s těmi synchronními. Největší možnost setkat se s nimi máme u zapisovačů, různých typů tiskáren, a elektricky řízených strojů (posuvných). Pozadu nezůstává ani oblast regulační a řídicí techniky, kde se KM s převodovkou společně využívají na změny mechanických poloh ventilů, směšovačů, posuvů os malých NC strojů aj. KM jsou nejjednodušším akčním členem pro převod digitálního signálu na změnu polohy úhlu rotoru (otočení rotoru). V principu si můžeme KM představit jako synchronní stroj, v němž namísto točivého pole, generovaného třífázovým sinusovým napájecím napětím statorového vinutí, je generováno "poskakující" magnetické pole postupným napájením jednotlivých pólových dvojic stejnosměrným proudem. Počet stabilních poloh rotoru je pak dán počtem kroků motoru na jednu otáčku. V následující tabulce nalezneme popis základních parametrů, se kterými se můžeme u KM setkat. [24]

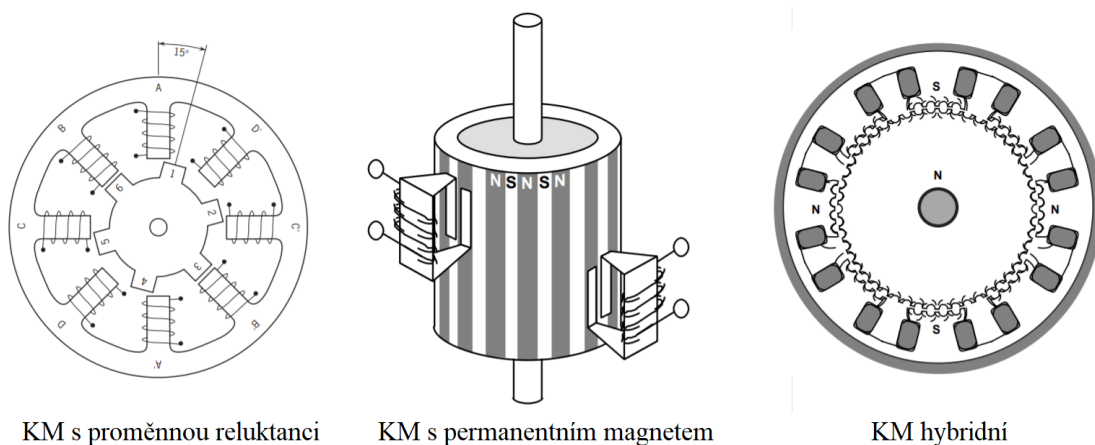
Tabulka 4 Parametry KM

Parametr	Popis
Krok	Reakce rotoru KM na řídicí impuls. Rotor se při jednom kroku pootočí z výchozí polohy do nejbližší magnetické klidové polohy.
Úhel kroku	α (°) je jmenovitý úhel, jenž odpovídá změně polohy rotoru po příchodu jednoho impulsu.
Stator	Statická část motoru s vinutím
Rotor	Otočná část motoru

Typy krokových motorů

Existují tři hlavní typy krokových motorů, jimiž jsou:

- KM s proměnnou reluktancí;
- KM s permanentním magnetem;
- KM hybridní.



KM s proměnnou reluktancí

KM s permanentním magnetem

KM hybridní

Obrázek 19 Typy KM motorů schematicky [24]

KM s proměnnou reluktancí (pasivní rotor)

Krokové motory s proměnnou reluktancí patří mezi typově nejstarší. Jedná se o nejjednodušejší pochopitelné KM. Na obrázku č. 19 vidíme typický motor s proměnnou reluktancí. Rotor se skládá pouze z plechových svazků ve tvaru zubů. Rotor nemá žádné vinutí. Aplikováním napětí na cívky se póly zmagnetizují a rotor se otočí. KM má vůči své velikosti relativně malý krouticí moment a jeho řízení je bez použití mikrokontroleru (dále MCU) nepřesné a náročné. [24; 31]

KM s permanentním magnetem (aktivní rotor)

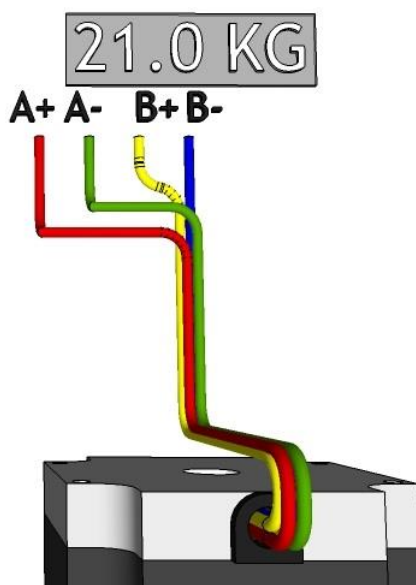
KM s permanentním magnetem jsou tvořeny rotorem vyrobeným z permanentního magnetu. Magnet je orientovaný radiálně a po obvodu se střídají severní a jižní póly magnetu. Počet pólů rotoru je poloviční počtu pólů statoru. Jednoduchá konstrukce KM, a tedy nízké náklady předurčují KM k použití například v automobilním průmyslu a spotřební elektronice, kde není překážkou velikost kroku $7,5^\circ$ nebo 15° . [24; 31]

KM hybridní

V dnešní době jedny z nejpoužívanějších krokových motorů jsou motory hybridní. Tyto KM kombinují nejlepší vlastnosti předchozích KM. Cena je vyšší, ale je vyvážena větší přesností ($3,6^\circ - 0,9^\circ$). Rotor je ozubený jako KM s proměnnou reluktancí a je axiálně zmagnetizovaný podobně jako KM s permanentním magnetem. Rotorové pólové nástavce tvarově připomínají ozubené kolo. Počet zubů udává počet kroků na jednu otáčku KM. Například 50 rotorových zubů znamená velikost kroku $1,8^\circ$. Rotorové nástavce jsou proti sobě v osové poměru natočeny o polovinu zubové rozteče. Proti zubům jednoho nástavce leží drážky druhého nástavce. Stator obsahuje osm vinutých pólů, které jsou také opatřeny zuby. Počet zubů statoru a rotoru nejsou shodné. Obvykle je zvolen počet rotorových zubů větší. Vhodným buzením vzniká rotační magnetické pole, které se rotor snaží sledovat a pootáčí zuby do magneticky klidové polohy. [24; 31]

Motory NEMA 23

Jak již bylo zmíněno výše, měli jsme k dispozici přesně tři KM, a to typu NEMA 23, jež jsou hybridní. Tento model je konstruován pro maximální zatížení 21 kg s proudem až 3 A. Popis kabeláže motoru popisuje následující obrázek.



Obrázek 20 Popis zapojení KM [40]

5.2.2 Drivery krokových motorů

Krokové motory jsou velice dobře říditelné širokým spektrem mikrokontrolérů. Tyto MCU mají obvykle omezený výstupní proud na řídicí pin, proto je potřeba vložit mezi MCU a výkonovou elektroniku KM. Tato elektronika se stará o přeložení řídicích impulsů procesoru do výkonových výstupů budících vinutí cívky motoru. Název této řídicí elektroniky můžeme přeložit z anglického slova driver jako řidič. Parametry KM jsou velice ovlivněny právě drivery. Například krouticí moment může být zvětšen u vyšších rychlostí rychlejším přepínáním cívek. Největším problémem je indukance samotných cívek motoru. Tento problém lze vyřešit vyšším provozním napětím motoru, ale zároveň je nutné ochránit vinutí motoru před přehřátím, omezením proudu. Driver tedy s vyšší složitostí řízení zvyšuje kvalitu řízení motoru, ale také celkové náklady. [26]

Drivery TB66004A

Pro účely stavby byly pořízeny tři kusy driveru TB66004A. Napájecí napětí může být v rozsahu 12 V až 36 V a maximální špičkový proud 4 A. Dlouhodobý doporučený proud je ovšem nižší. Drivery umožňují mikro-krokování, a to od režimu celého kroku až po 1/32 kroku, které lze nastavit na integrovaném páčkovém přepínači. Jemnější krokování má za následek jemnější chod a zvýšení citlivosti motoru. Cena jednoho driveru se pohybuje v rozmezí 400 Kč až 500 Kč v závislosti na prodejci.

Možným ekvivalentem výše uvedených driverů je deska TB6560. Deska TB6560 se dá pořídit za podobnou cenu, díky které je srovnatelná s řešením pomocí driverů TB6600. Výhodou této je ovšem fakt, že disponuje vstupy pro tři motory (osy), vstupem pro samotné vřetenno, koncové spínače, a to vše na jedné desce.

Vzhledem ke skutečnosti odlišné realizace jednotlivých os manipulátoru byly vybrány drivery typu TB6600 umožňující snadné nastavení jednotlivých KM. Využití jednotlivých driverů mimo jiné dovoluje jejich umístění v blízkosti motoru bez nutnosti dlouhého vedení. Této vlastnosti později nebylo nevyužito, místo toho bylo využito blízkého spojení s řídicí jednotkou platformy Arduino. Veškerá výkonová elektronika KM byla napájena pomocí externího spínaného zdroje s parametry 12 V a 100 W. Zdroj byl umístěn společně s drivery a Arduino deskou na boku konstrukce manipulátoru.

Mikro-krokování

Plnou délku jednotlivých kroků lze rozdělit do menších inkrementů pohybu rotoru. Tento režim je nazýván jako mikro-krokování, respektive drobení kroku (micro-stepping, mini-steps). Za předpokladu, že v jedné fázi bude probíhat postupné snižování hodnoty budicího proudu a zároveň hodnota proudu sousední fáze bude zvyšována, výsledný vektor magnetické indukce se bude pohybovat mezi krajními hodnotami, zapříčiněnými buzením jednotlivých fází. U dvoufázových hybridních motorů je pro jeden plný krok zapotřebí provést rotaci magnetického pole o 90° elektrických. Uvažujeme-li dále o momentu motoru, měnící se sinusově s polohou rotoru a mezní vazební moment úměrný proudu fází, můžeme napsat rovnice:

$$M_A = -k_T * i_A * \sin(N * \Delta\Phi) \quad (1)$$

$$M_B = -k_T * i_B * \sin(N * \Delta\Phi - \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

kde k_T značí konstrukční konstantu motoru a hodnoty i_A (A) společně s i_B (A) odpovídají proudům v jednotlivých fázích. [25]

Během provozu s využitím plné délky kroku je využíváno buzení fáze za pomoci záporné nebo kladné hodnoty proudu o velikosti $I = 3$ A. Pro KM typu NEMA 23 se poté výsledný vektor magnetického pole pootočí o výše zmíněný úhel $\varphi = 90^\circ$ elektrických. Při použití funkce drobení kroku se úhel pootočení φ rozdělí na několik tzv. mini-steps ($n =$ počet mini-steps). Pro velikost proudu jednotlivými fázemi následně platí rovnice: [25]

$$i_A = I * \cos\left(\frac{k * \varphi}{n}\right) \quad (3)$$

$$i_B = I * \cos\left(\frac{k * \varphi}{n} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4)$$

Pro daný KM uvažujme o vykonání celkově čtyř mikro-kroků ($n = 4$) na jeden běžný krok. Následně budou platit poměry proudů jednotlivých fází dle tabulky č. 5. [25]

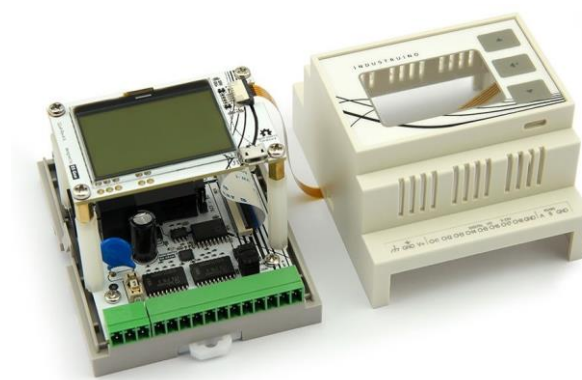
Tabulka 5 Hodnoty proudu v jednotlivých fázích při použití mikro-krokování [25]

Mikro-krok (k)	Úhel otočení φ (°)	Proud ve fázi A i_A (A)	Proud ve fázi B i_B (A)
0	0	I	0
1	22,5	0,924 I	0,383 I
2	45	0,707 I	0,707 I
3	67,5	0,383 I	0,924 I
4	90	0	I

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole o driveru TB6600, nastavení krokování má za následek jemnější chod motoru a zvýšení jeho citlivosti (přesnosti).

5.3 Elektronika na bázi Arduino

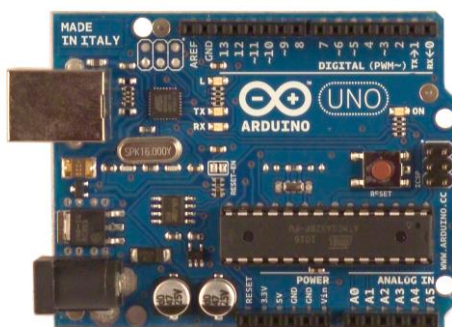
Vzhledem k povaze použití stroje (hobby) bylo rozhodnuto neinvestovat tisícové částky za náklady na stavbu stroje, a tak byl jako řídicí elektronika vybrán jednodeskový počítač Arduino založený na mikrokontrolorech ATmega od společnosti Atmel. Tento projekt pocházející z Itálie je mimo jiné open-source. Pokud bychom požadovali od stroje odolnost vůči zvýšeným nepříznivým vlivům pracovního prostředí (teplota, vlhkost, prašnost), či nepřetržitý provoz, bylo by za řídicí elektroniku zvoleno PLC Industruino. Na obrázku č. 21 je Industruino, což je plnohodnotné PLC kompatibilní s deskami Arduino.



Obrázek 21 Industruino [46]

5.3.1 Vývojová deska Arduino

Pravděpodobně nejpoužívanější vývojovou deskou Arduino je model Uno R3 s mikroprocesorem ATmega328P. Mezi její výhody patří nízká cena v řádech stokorun a nepřeborné množství desek rozšiřující funkce a množství pinů, tzv. shieldy. Počet pinů je u modelu UNO stanoven na 14 digitálních vstupně-výstupních a 6 analogových vstupních, které lze použít i jako digitální. [27]



Obrázek 22 Vývojová deska Arduino Uno [41]

Na obrázku č. 22 lze na spodní straně vidět 6 analogových vstupů, nahoře pak 14 digitálních. Mimo jiné je na desce zabudován LED indikátor komunikace sériové linky (TX, RX) a tlačítko reset, jež přeruší aktuálně zpracovávaný proces a následně jej ukončí.

Tabulka 6 Přehled základních modelů Arduino [27]

Arduino deska	Mikrokontrolér	Flash paměť (KiB)	Počet digitálních I/O pinů	Počet analogových pinů
Uno R3	ATmega328P	32	14	6
Nano	ATmega328	32	14	8
Mega	ATmega1280	128	54	18
Mega2560	ATmega2560	256	54	18
Leonardo	ATmega32u4	32	14	6

Kdyby bylo použití stroje v nepříznivém pracovním prostředí, například se zvýšenou prašností či vlhkostí, zřejmě by bylo využito modelu Industruino, který je zmíněn výše.

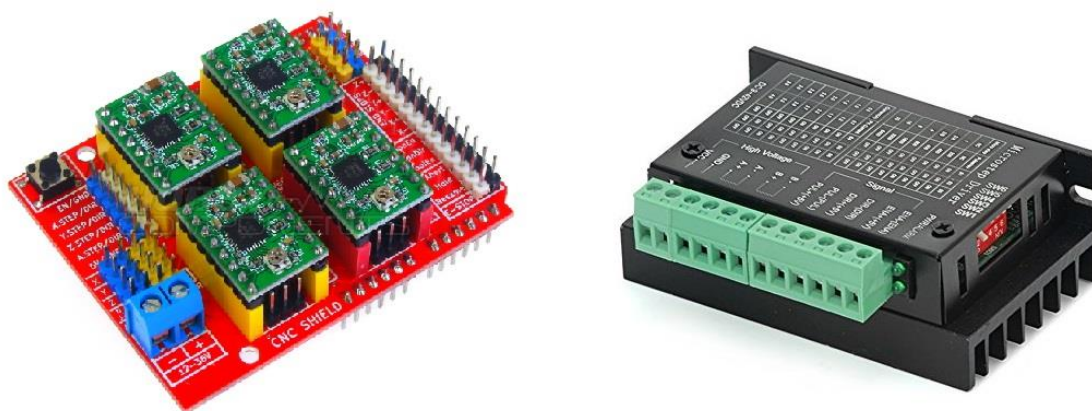
5.3.2 Moduly a shieldy rozšiřující funkci

Rozdíl v terminologii modul a shield je následující. Modul je samostatná komponenta, jež je schopna komunikovat s deskou Arduino po napojení na piny, které si uživatel definuje. Shield je deska, rozšiřující o danou funkci, na které jsou zakomponovány veškeré součástky potřebné pro správný chod shieldu. Deska (shield) se napojí na vrchní část Arduino desky, čímž obsadí veškeré jeho piny. Většina shieldů replikuje piny, jež obsadí na desce Arduino, a tak je možné využití několika různých shieldů rozšiřující funkce, nebo možnost připojení dalších modulů. Tabulka č. 7 obsahuje soupis modulů a shieldů pro desku Arduino, jež se běžně používají pro obdobné projekty.

Tabulka 7 Základní moduly a shieldy vhodné pro stavbu strojů

Moduly	Shieldy
Infračervený senzor Optický senzor rychlosti Průtokoměr Joystick modul Modul pro SD kartu	CNC shield LCD shield Ethernet shield Relé shield

Vzhledem k velikosti krokových motorů nebylo možné použít drivery typu A4988, jež se připojují na CNC V.3.0 shield (HCARDU0086). Tyto drivery jsou využitelné například pro bipolární KM s nižšími proudy okolo 2 A, které se využívají například pro 3D tiskárny a konstrukčně menší stroje, nežli popisovaný manipulátor. Až čtyři drivery lze zasunout do CNC shieldu, který se následně celý i s drivery připojí do Arduino. Obrázek č. 23 ukazuje rozdíly ve velikosti driverů.



Obrázek 23 CNC shield + 4x driver A4988 vs. driver TB66004A [42]

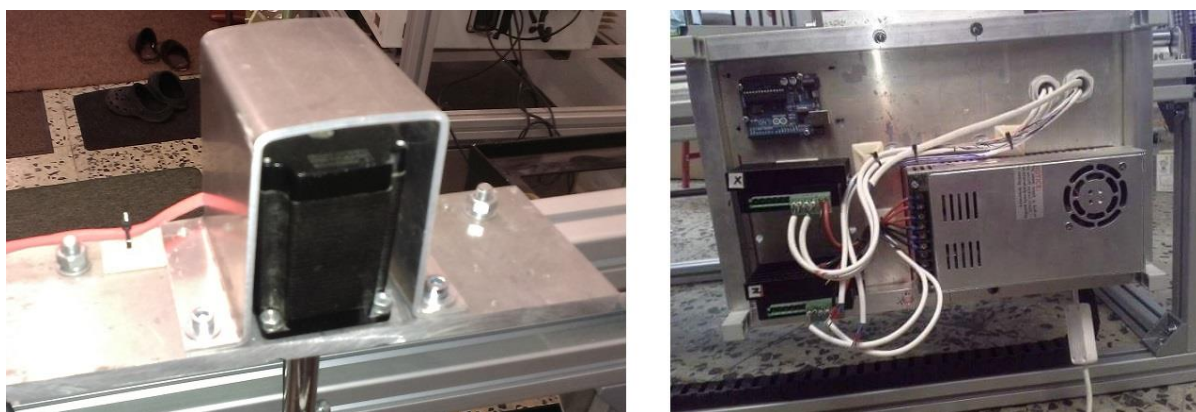
5.3.3 Konkrétní soupis pro manipulátor

Pro účely manipulátoru byl zvolen standardní model Arduino Uno R3, jenž disponuje dostatečným počtem digitálních pinů a velikostí paměti (32 KiB), do které byl nahrán program GRBL. Řídicí program byl následně spouštěn z PC. Následně byla odzkoušena vyšší verze Arduino desky (Mega2560), jenž se chová identicky, pouze se lišila v konfiguraci, která bude popsána v jedné z následujících kapitol. Mimo externích driverů a koncových spínačů nebyly použity žádné jiné moduly, ani shieldy.

5.4 Bezpečnost a ochranné prvky

Na stroji lze nalézt centrální vypínač, pomocí kterého může být celý stroj odpojen od elektrického proudu. V průběhu stavby, kdy jsme se zabývali jednotlivými subsystémy, jsme využívali dalších vypínačů pro jednotlivé okruhy. Tyto vypínače jsme zachovali i ve finální fázi, takže je možné odpojit separátně Arduino, motory, indukční modul nebo modul s frézou.

Na levé straně obrázku č. 24 lze vidět zakrytí KM za pomoci ohýbaných hliníkových plechů. Ty slouží k ochraně motorů před hrubým mechanickým poškozením a zároveň jako ochrana osob.



Obrázek 24 Krytí motoru a rozvodových kabelů

V průběhu stavby, kdy byly zkoušeny pohyby po jednotlivých osách, několikrát nastala situace, že jsme se snažili posunout manipulátorem mimo povolený rozsah. Na základě negativního vlivu této skutečnosti na funkci KM, jsme nainstalovali koncové

spínače. Celkově jsme použili 6 základních mechanických spínačů, jenž každý z nich byl umístěn na konec jedné ze tří os pohybu.

Ochrana kabeláže od koncových spínačů a KM je společně vedena v plastových energetických řetězech, které jsou připevněny na vnitřní stranu nosné konstrukce. Řetězy ochraňují před mechanickým poškozením, jenž může vzniknout vlivem posuvné konstrukce. Energetický řetěz je vidět v pravé spodní části obrázku č. 24.

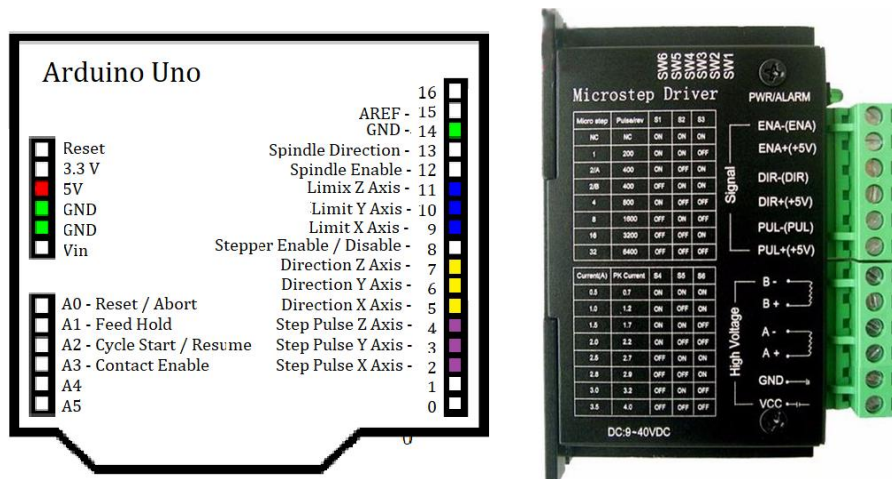
Při práci s elektrickým proudem a pohyblivými částmi stroje je doporučeno dbát vysoké opatrnosti a používat ochranné prostředky. Minimálně však ochranné brýle. Mezinárodní studie poukazují na podezření, podle kterých by mohlo vlivem elektromagnetických polí, a to i pod oblastí hraničních hodnot, vyvolávat nebezpečí rozvoje nádorových onemocnění. Mimo jiné hrozí nebezpečí lidem s kardiostimulátorem a srdečními onemocněními, kteří jsou v blízkém kontaktu s elektromagnetickou indukcí. Samozřejmě je nezbytně nutné dodat, že je velmi důležité využívat elektromagnetický indukční ohřev pouze v dostatečně větraných prostorech, z důvodu prokazatelné škodlivosti výparů. [33]

5.5 Elektrické schéma zapojení

Tato kapitola se zabývá popisem schémat elektrického zapojení manipulačních částí stroje. Na obrázcích přiložených níže lze vidět konkrétní zapojení jednotlivých prvků.

5.5.1 Zapojení řídicí elektroniky

Pro manipulátor bylo využito napájení Arduina pomocí USB kabelu z notebooku, který zároveň sloužil pro datový přenos instrukcí z řídicího programu. Další možností je napájení Arduino za pomoci spínaného síťového adaptéru (5 V). Poté ovšem vzniká nutnost umístění programu například na SD kartu (připojena pomocí rozšiřujícího shieldu), nebo v interní paměti Arduino, jenž dosahuje u modelu Uno omezené velikosti 32 KiB. Při použití této metody ovšem nelze program snadno zaměnit či upravit.

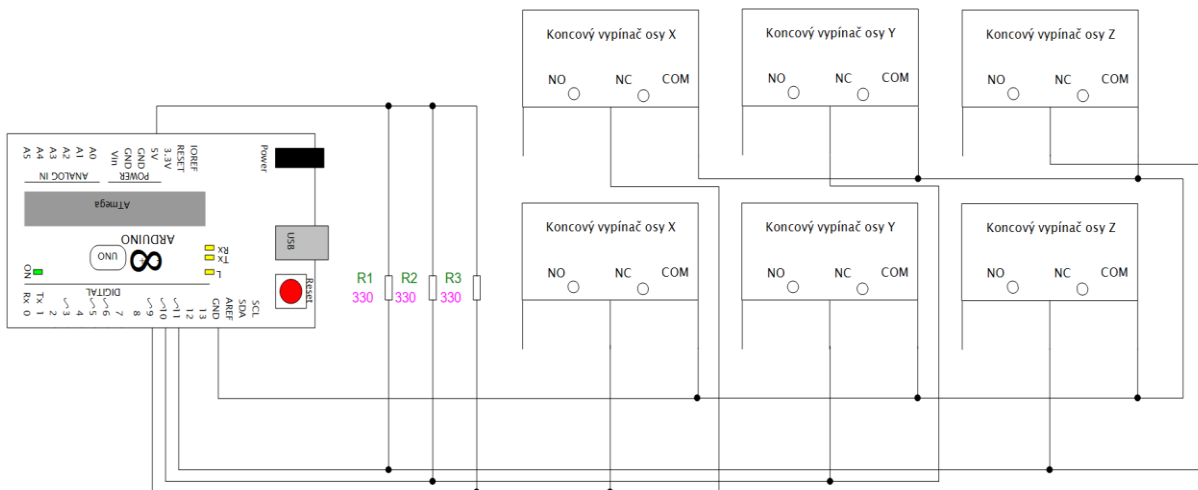


Obrázek 25 Popis pinů Arduino desky a driveru TB6600 [42]

Na obrázku č. 25 najdeme barevně označené digitální piny, které jsou pro účely manipulátoru obsazeny. Aby bylo možné pomocí signálů z PC komunikovat s KM, je nutné propojení Arduino s KM skrze drivery.

Řídící signál je přeposlán skrze pin PUL+, což je zkratka slova Pulse. Ve chvíli, kdy tento signál dorazí do KM, nastane posun motoru o jeden krok. Pro tyto účely je na desce Arduino vždy vymezen jeden digitální pin pro každou ze tří os pohybu. Společně se signálem pulse je odeslán do motoru signál DIR (Direction), který nese informaci o směru otáčení daného KM. Pokud signál obsahuje hodnotu High (logická 1), směr otáčení bude doprava a v případě hodnoty Low (logická 0) se jedná o směr doleva. Tyto piny jsou na výše uvedeném obrázku č.25 vyznačeny žlutou barvou. Veškeré piny na driverech, které jsou označeny znaménkem minus je nutné připojit k libovolnému GND pinu desky Arduino.

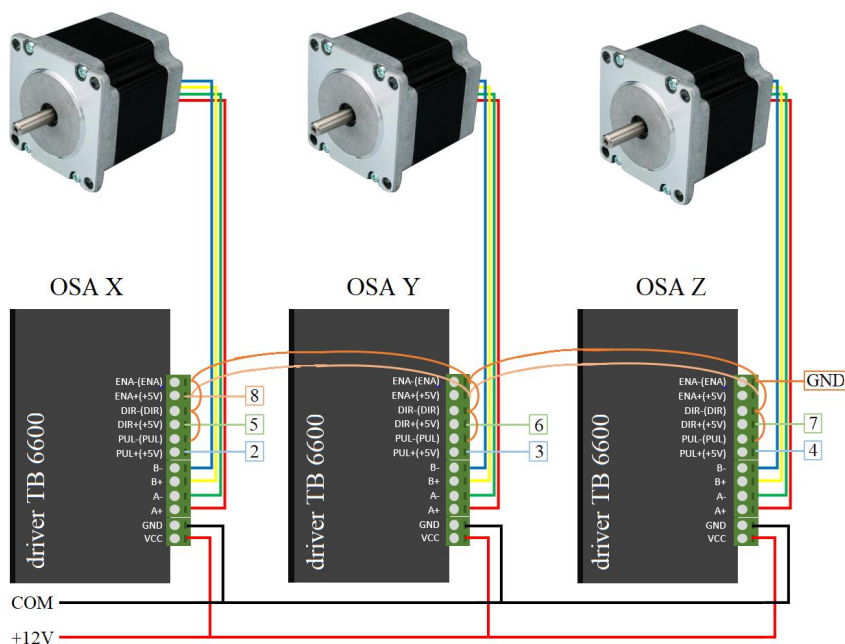
Jako poslední část řídicí elektroniky jsou koncové spínače. Pro tyto účely jsou používány piny vyobrazené taktéž na obr. č. 25 a to modrou barvou. Tyto piny se též označují jako limit piny. Konkrétní schéma zapojení si lze prohlédnout na obrázku č. 26. Na tomto obrázku lze vidět, že jednotlivé koncové spínače je nutné napájet napětím 5 V které je vedeno skrze 330 Ohmové rezistory. Zároveň jsou propojeny NC piny na jednotlivých koncových spínačích s výše zmiňovanými limit piny na desce Arduino. Následně zbývá napojit veškeré COM piny ze spínačů na GND pin desky Arduino (model Uno disponuje 3 x GND pinem). NC a NO značí principy fungování koncových spínačů. NC je logika nazývána „normally closed“ jenž odpovídá principu funkce rozpínacího kontaktu. NO odpovídá logice spínacího kontaktu.



Obrázek 26 Schéma zapojení koncových spínačů dle logiky NC

5.5.2 Zapojení elektroniky akčních členů

Jak lze vidět na obrázku č. 27, motory jsou skrze drivery jednotlivě napájeni pomocí 12 V zdroje s centrálním vypínačem. Následně jsou jednotlivé fáze označované na driveru znaky A+, A-, B+, B-, připojeny ke konkrétním kabelům, vedoucím od KM. Každý motor se může v závislosti na typu a výrobci lišit v barevnosti kabelů. Z tohoto důvodu je nutné dohledat specifikaci daného motoru, abychom věděli, který kabel odpovídá příslušné fázi. Pro KM manipulátoru byla použita specifikace z obrázku č.20. V následujícím obrázku je kompletní soupis, díky kterému bude možné pohybovat manipulátorem ve třech osách.



Obrázek 27 Zapojení akčních členů skrze drivery k desce Arduino

5.6 Softwarové vybavení

S rozmachem Arduino platformy se zvýšil počet staveb domácích hobby strojů, jenž vyžadují pouze základní potřeby pro ovládání jednotlivých os. Díky tomu se značně rozšířil sortiment a podpora nabízených open-source programů.

5.6.1 Program GRBL

Program GRBL provozován pod licencí open-source je interpret jazyka G (G-kód) a ovladač KM pro CNC stroje. GRBL je naprogramován v jazyce C a je určen pro platformu Arduino. Program GRBL je alternativou k použití paralelního portu, a tak umožňuje bez komplikací komunikovat pomocí USB. Stačí korektně nastavit datovou rychlost udávanou v bytech za sekundu, případně změnit nastavení parity a stop bitů. Výchozí hodnotou je 8 datových bitů, žádná priorita a jeden stop bit. [32]

Technické omezení

GRBL je omezen pro pohyb maximálně ve třech osách souřadného systému, to znamená, že není podporována manipulace s rotačními osami. Dále je množina podporovaných instrukcí záměrně omezena pouze na ty základní. Rozšířené instrukce, u nichž se nepředpokládá použití pro jednoduché CNC obráběcí stroje nejsou podporovány. [32]

Flash GRBL do Arduino

Program GRBL je nutné nahrát do interní paměti Arduina (EEPROM). Nejjednodušším způsobem je importování GRBL knihovny pomocí oficiálního Arduino IDE vývojového prostředí. To ovšem není běžně využíváno pro aplikace, jako je manipulátor. Je tedy třeba provést tzv. flash GRBL do Arduina.

K této operaci je potřeba stáhnout SW nazývaný Xloader. Xloader je program, který se využívá k nahrání libovolného hexadecimálního souboru do desky Arduino za pomoci bootloaderu. Další potřebnou komponentou je stažení samotného hexadecimálního souboru s programem GRBL. Jak již bylo zmíněno výše, GRBL je přizpůsobeno přímo pro modely Arduino, je tedy třeba zvolit verzi souboru, jenž podporuje konkrétní desku s daným procesorem. Pro desku Uno jsme využili GRBL v0.9g s datovou rychlostí 115200 bitů za jednu sekundu.

Postup nahrání programu je následující:

- připojení Arduina pomocí USB k PC;
- nastavení COM portu ve správci zařízení;
- nastavení přenosové rychlosti (identická s verzí GRBL);
- otevření Xloader;
- výběr COM portu, ke kterému je připojeno Arduino;
- zvolení přenosové rychlosti;
- import hexadecimálního souboru.



Obrázek 28 Program Xloader [43]

V případě zdárného nahrání do EEPROM paměti na desce Arduino se v levém spodním rohu objeví informativní textace obsahující velikost nahraného hexadecimálního souboru (viz. obrázek č. 28). Úspěšnost lze ještě dodatečně ověřit pomocí jednoduché kontroly v libovolném SW podporujícím GRBL, jenž jsou popsány v následující kapitole.

5.6.2 Grafické rozhraní

Po úspěšně dokončeném nastavení je Arduino schopno komunikovat s KM pomocí příkazů G-kód. Nejtriviálnější formou, jak zadávat příkazy KM je skrze open-source software Arduino IDE.

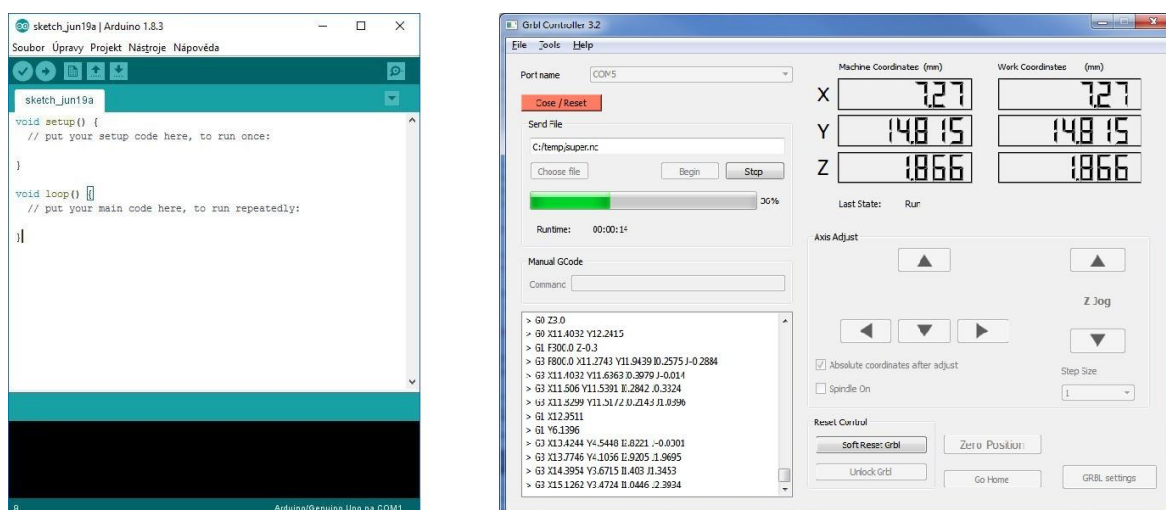
Arduino IDE

Tento software psaný v jazyce Java je vyvíjen přímo společností Arduino, která zajišťuje plnou kompatibilitu se všemi oficiálními modely. Výchozí SW pro Arduino díky své modularitě umožňuje rychlou změnu nastavení v závislosti na modelu desky, případně dynamické vkládání knihoven (také GRBL) pro rozšíření funkce či nahrání již dříve vytvořeného kódu. Mezi výhody tohoto SW patří možnost snadného nahrání programu do interní paměti Arduino desky a možnost diagnostiky připojení a komunikace PC s deskou. Bohužel pro potřeby řízení manipulátoru tento SW nabízí pouze příkazovou řádku,

skrze kterou lze zadávat jednotlivé instrukce v jazyce G. Arduino IDE je ideální vývojové prostředí pro tvorbu programů a knihoven v dialektu jazyků C/C++, ne ovšem pro potřeby realtime ovládání KM.

GRBL Controller 3.0

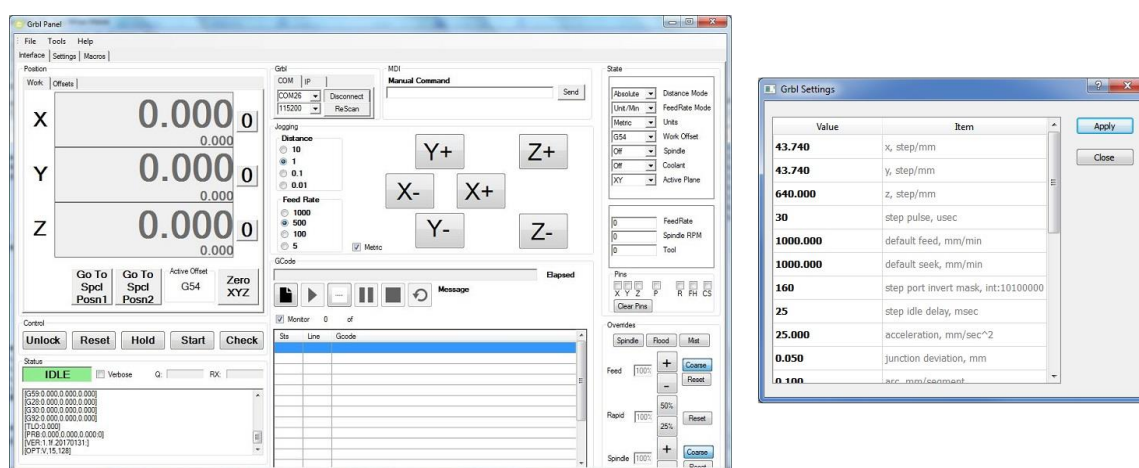
GRBL Controller je software navržený k odesílání G-kód instrukcím do CNC strojů jako jsou například frézy. Tento SW verze 3.0 psaný v jazyce C++ byl zvolen jako prvotní varianta pro účely ovládání sestavovaného manipulátoru. Nyní již zastaralá verze 3.0 umožňuje provádět základní operace typu nahrání externího *.nc programu, zadání instrukce do příkazové řádky, manuální posun jednotlivých os či zobrazení aktuální referenci používaných os. Novější verze programu disponují možností sofistikovanějšího nastavení posuvů a realtime vizualizací spuštěného .nc souboru. Bohužel během testování zmiňovaného softwaru se latence mezi odeslanou instrukcí a jejím zpracováním pohybovala v rámci jednotek sekund. Na základě této negativní kompatibility systému vznikla nutnost vyhledat jiný řídicí software. Porovnání GUI mezi Arduino IDE a GRBL Controllerem lze vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 29 Porovnání GUI Arduino IDE vs. GRBL Controller [44; 45]

GRBL Control panel

Jako finální řídicí SW byl zvolen GRBL Control, který splnil požadavky na přizpůsobitelnost použitému HW a konfigurovatelnost. Tento SW považuje CNC stroj za generické zařízení. Veškeré změny v nastavení přetrvávají v nastavení do opětovného spuštění. Program je vytvořený v jazyce VB.NET. Oproti předchozímu programu jsou latence zanedbatelné. GUI tohoto SW je sice méně přehledné nežli u výše zmiňovaných, ovšem tento nedostatek je díky vlastnostem SW zanedbatelný. Mimo dříve zmíněných základních funkcí, zde může být použito funkcionality typu: nulování reference pomocí tlačítka, skok na uloženou referenci, návrat výchozí reference, přepínání mezi metrickými a imperiálními jednotkami, pozastavení běžícího programu, předefinování velikostí kroků, zvýšení rychlosti otáčení KM, nastavení rozjezdové a dojezdové rychlosti KM nebo nastavení limitů pro maximální rychlost otáčení.



Obrázek 30 Control panel GUI [45]

Jak již bylo zmíněno v kapitole zabývající se importem GRBL do Arduino desky, je třeba před začátkem práce ověřit funkčnost systému. Před otevřením ovládacího softwaru je třeba mít připojeno Arduino k PC s úspěšně importovaným GRBL. Následně je zapotřebí spustit ovládací SW (obr. č. 30), jenž automaticky nabídne aktivní COM port s Arduinem. Zvolíme identickou přenosovou rychlost, jako je nastavena ve správci zařízení a jaká je podporována v dané verzi GRBL. Dále stačí zmáčknout tlačítko connect. Pokud byly všechny předchozí kroky provedeny správně, bude zobrazen v příkazové řádce programu text ve tvaru: „Grbl 0.9g ['\$' for help]“.

5.6.3 G-kód

G-kód je díky mnoha jeho variantám jeden z nejrozšířenějších programovacích jazyků pro NC stroje. Převážně pak využíván v CAM programech pro obráběcí stroje, u kterých se programuje dráha nástroje vůči obrobku. Jazyk byl prvotně vyvinut již začátkem šedesátých let, avšak několikrát se do osmdesátých let změnil. Zjednodušeně řečeno, G-kód je způsob, kterým jsme schopni komunikovat a řídit mechanický stroj. Komunikace probíhá pomocí takzvaných instrukcí, případně sledu několika instrukcí za sebou. Tyto instrukce obsahují informaci o trajektorii a rychlosti pohybu, který se má vykonat. G-kód nabízí možnost výběru dvou režimů polohování, a to absolutní a relativní. U absolutního polohování se souřadnice udávají v pevně definovanému referenčnímu bodu, zatímco u relativního (přípustkového) polohování se hodnota vztahuje k poslednímu bodu. Nejčastěji se G-kód instrukce využívají k ovládní pro řezné nástroje, lasery, 3 D tiskárny a jiné zařízení. Zdrojem G-kódu může být textový soubor, aplikace generující kód nebo generátor jako je CAM software, případně doplňky pro CAD programy. [38]

Základní příkazy

Příkazy uvedené v tabulce č. 8 jsou považovány za minimum pro možnost polohového nastavení frézky, v tomto případě os manipulátoru.

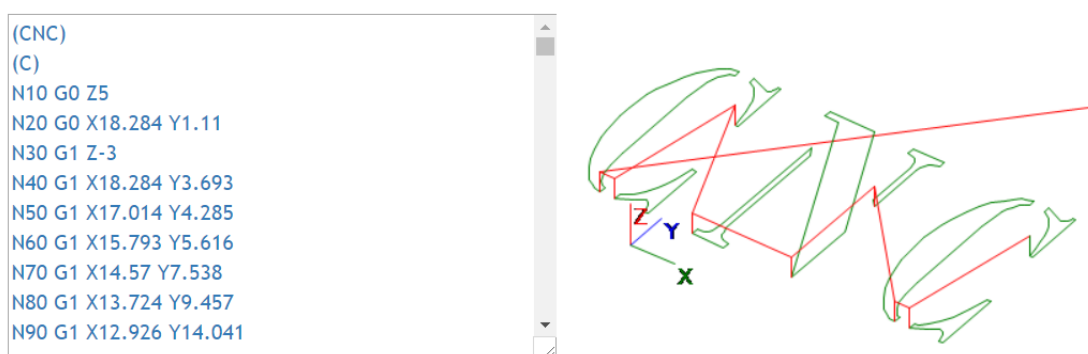
Tabulka 8 Základní instrukce jazyka G [38]

Příkaz	Popis funkce
G0	Rychloposuv
G1	Lineární interpolace
G10	Nastavení aktuální pozice jako počáteční
G20/G21	Přepnutí mezi imperiálními a metrickými jednotkami
G90	Přepnutí do absolutního souřadného systému
G91	Přepnutí do inkrementálního souřadného systému

V případě neznalosti G-kódu lze využít nástrojů, jež generují příkazy v jazyce G, na základě zadaných hodnot a základního nastavení. Mezi takové nástroje patří online generátory, či desktopové aplikace do kterých lze nahrát soubor například i z grafického programu.

Online generátory kódu

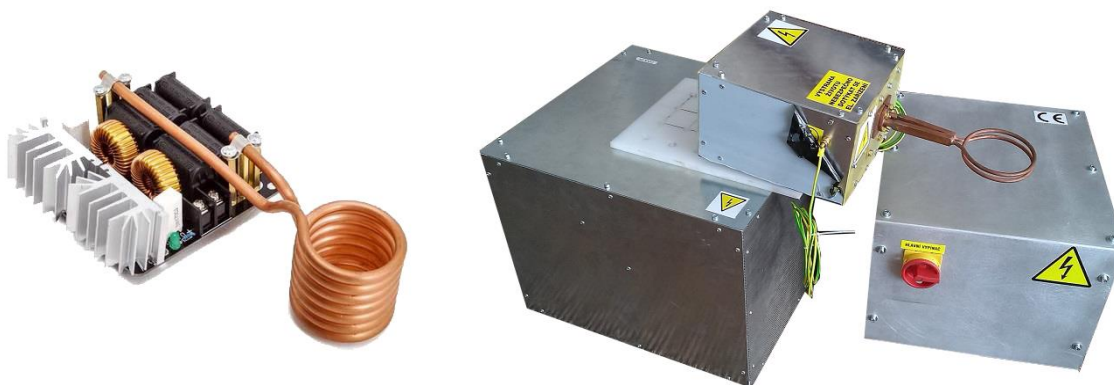
Na internetu lze využít zdarma nespočet generátorů, jenž po zadání textu nebo nahrání obrázku vygenerují G-kód. V rámci testování modulu pro frézování byl využit nástroj společnosti MicroTech StellaData. Výstup data z generátoru jsou ukázána na obrázku č. 31. Tento online nástroj umožňuje nadefinování několika základních parametrů jako jsou: text, výška textu, šířka textu, hloubka obrysu, výška vřetena nad materiálem a výběr ze dvou předdefinovaných fontů textu.



Obrázek 31 Online generátor G-kódu

5.7 Modul pro indukční ohřev

Modul pro indukční ohřev, jenž je vyobrazen na levé straně obrázku č. 32, je určen díky svým parametrům výhradně pro hobby použití. Na obrázku lze porovnat jeho velikost se strojem primárně určeným pro průmyslové aplikace. Tento stroj, jenž ke své správné funkci vyžaduje připojení vlastního vodního chlazení a externího zdroje byl vyroben společností Rillfem s.r.o. Zmiňovaný hobby indukční modul je schopen efektivně ohřívat součásti do průměru 10 mm při použití hraničních hodnot napětí (48 V). Oproti tomu, stroj od zmíněné společnosti zvládá několiknásobek ohřívaného rozměru.



Obrázek 32 Porovnání strojů pro indukční ohřev [33]

5.7.1 Nízkonapětový indukční modul

Výše uvedený indukční modul lze pořídit v přepočtu za 700 Kč a nabízí parametry, jež zajišťují dostatečný výkon i pro žíhání a kalení rozměrově malých součástí (do 10 mm efektivně). Níže jsou uvedeny základní parametry modulu:

- 12 V až 48 V dovolené nízkonapětové napájení;
- jmenovitý proud až 20 A;
- jmenovitý výkon až 1000 W (vyšší napětí = vyšší výkon);
- krátkodobá možnost navýšení parametrů na 53 V a 30 A;
- 24 V na vstupu odpovídá proudu bez zátěže 3 A;
- 48 V na vstupu odpovídá proudu bez zátěže 6 A.

Je doporučeno, aby objem ohřívanych součástí nebyl větší než 1/10 vnitřního objemu topné cívky (průměr ohřívacího válce je větší než 1/3 průměru topné cívky), jinak by mohlo nastat přetížení a následně spálení celého okruhu. Obvod je sice dimenzován na zatížení 30 A vstupního proudu, ovšem pojistka je z bezpečnostních důvodů 20 A. [34]

5.8 Modul pro frézování

Pro účely frézování disponuje manipulátor na ose X předpřipraveným držákem pro upevnění ruční frézy. Výhoda spočívá v možnosti záměny běžně využívané čelní válcové frézy za frézu gravírovací. Ukázka jejího využití je zobrazena na obrázku č. 33. Při frézování je třeba dbát zvýšené opatrnosti a pečlivě volit instrukce odesílané ke zpracování, jelikož snadno může dojít k poškození frézy z důvodu příliš velkého úběru materiálu. Frézovaný materiál je upevněn do pracovního prostoru manipulátoru, na němž je přidána kovová deska potřebné velikosti z důvodu dodání stability. Testování probíhalo na měkkých materiálech (dřevo, hliník).



Obrázek 33 Test gravírování do dřeva

6 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou a stručným rozbořem parametrů aplikace indukčního ohřevu ať už v hobby nebo profesní sféře využití. Je poukázáno na výhody indukčního ohřevu, díky kterým je tato metoda hojně používána a v průmyslu oblíbená. Zejména pak díky malým ztrátám, které jsou zapříčiněny přímým ohřevem součástí. Následuje výčet způsobů využití, se kterými se lze nejčastěji setkat v praxi. O této problematice pojednává první část práce. V následující části předkládané bakalářské práce lze nalézt stručný popis celkové stavby manipulátoru s modulem pro frézování a přípravou pro modul indukčního ohřevu. Popis obsahuje postup práce, jenž byl v konkrétním případě použit s popisem jednotlivých technologií možných pro stavbu obdobného stroje, základním vysvětlením principu technologie a ukázkou finálně zvolených komponent. V závěru práce (přílohy) a také již v průběhu praktické části se lze setkat s fotografiemi reálné stavby pro účely práce, jež dokládají funkčnost celého systému.

V literární rešerši se podařilo shrnout klady technologie s odůvodněním, proč se za posledních několik desítek let velice rozšířila do různých odvětví využití. Lze tedy porovnat začátky využívání indukčního ohřevu spolu s indukci, jak ji známe dnes. A to nejen díky zdokonalování technologií, které před několika lety nebyly dostupné. Mimo jiné získáme povědomí o faktorech ovlivňujících funkci ohřevu, jež se liší pro každý konkrétní typ použití.

Během praktické části práce jsme se posunuli od návrhu a vizualizace manipulátoru, až k jeho stavbě. Vždy byly popsány možnosti technologií pro konkrétní stavbu s uvedením zvolené varianty a jejím konkrétnějším popisem, případně odůvodněním. Úspěšně se podařilo postavit tuhou konstrukci, která následně byla osazena motory a řídicí elektronikou společně s bezpečnostními prvky. Konstrukce obsahuje úchyt na modul pro funkci frézování. Zamýšlený modul pro indukční ohřev bohužel ještě nebyl zrealizován a nachází se ve stavu plánování. Na základě veškerých provedených testů a dosavadních prací se strojem se ukázaly nedostatky, jež by bylo vhodné do budoucna odstranit. Jedním z nich je nepřesnost řemenového pohonu pro osu X, kde dochází k občasnému prokluzu řemenu z důvodu dřívějšího opotřebení řemenici. To má za následek nepřesnosti, které mohou mít nepříznivý vliv na konečný výsledek práce konané na stroji. Dalším nedostatkem odhaleným při provozu bylo znečištění lineárního vedení, na kterém následně vznikalo zvýšené tření při pohybu.

Bylo by vhodné doplnit konstrukci manipulátoru o krycí měch proti nečistotám vzniklým při práci s frézovacím modulem.

Zrealizovaný manipulátor byl postaven s podstatně nižšími náklady oproti cenám, za něž se prodávají pojízdné konstrukce, které by se musely dodatečně upravovat tak, aby splnily požadavky, které byly definovány před započatím stavby. Úsilí vynaložené na realizaci manipulátoru splnilo očekávání. Stavba byla velkým přínosem zkušeností a poskytla pohled do dané problematiky. Zkušenosti získané během stavby mohou být využity pro budoucí projekty nebo další vývoj stroje, který by zcela jistě bylo vhodné upravit na základě výše popsaných nedostatků. Během kalibrací motorů bylo využita fixa připevněná ke konstrukci, pomocí které byla zjišťována správná trajektorie pohybu. Během této kalibrace vznikla myšlenka úpravy držáku pro frézovací modul způsobem, který by umožnil stabilní uchycení laseru / fixy. Následně by se dal stroj využívat k laserovému gravírování / kreslení.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] KUNC, Marek. *Průmyslové využití ohřevů elektromagnetickou indukcí*. Plzeň, 2014. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Jiří Kožený.
- [2] *Innovative Induction Heating Equipment: What Is Induction Heating?* [online]. c2018 [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: http://www.gh-ia.com/induction_heating.html
- [3] *ROBOTERM spol. s r.o. - indukční ohřevy: Co je indukční ohřev* [online]. c2012 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.roboterm.cz/home/co-je-indukcni-ohrev>
- [4] RADA, Josef et al. *Elektrotepelná technika* 1. vyd. Praha: SNTL, 1985, 185s.
- [5] DRIML, B. Kalení a popouštění. [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep07.pdf>
- [6] *Tepelné zpracování oceli: Kalení a popouštění* [online]. 2013 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://ometalurgii.wordpress.com/>
- [7] *Materials Engineering: Perfect Induction Heating Achieved Through Custom Manufacturing* [online]. 2017 [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=13888>
- [8] *Nejčtenější strojírenský časopis: Indukční procesy pájení* [online]. 2017 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/indukcni-procesy-pajeni.html>
- [9] *Časopis Elektro - Odborné časopisy: Indukční ohřev (5)* [online]. c2014-2018 [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/indukcni-ohrev-5--14595>
- [10] ZINN, S; SEMIATIN, S.: *Elements of Induction Heating – Design, Control and Applications*, DOI: 10.1361/eoih1988p001
- [11] ČERNÝ, Václav. *Indukční ohřev (5)*. Časopis Elektro. Praha: FCC PUBLIC, roč. 2002, č. 10, s. 56. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/indukcni-ohrev-5--14595>
- [12] *ELEKTRICKÉ INDUKČNÍ PECE VE SLÉVÁRNÁCH*. Brno, 2012. Bakalářská práce. FSI VUT. Vedoucí práce Jaroslav Šenberger.
- [13] DVOŘÁK, Zdeněk. *Procesní inženýrství III: Elektrické teplo* [on-line]. Zlín, 2008 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: http://web.ft.utb.cz/cs/docs/T7PY_elektricke_teplo.pdf
- [14] ŠENBERGER, J. et al. *Metalurgie oceli na odlitky*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2008,., ISBN 978-80-214-3632-9.

- [15] *Aceso: Vakuové indukční tavení*. [online]. c2016 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <http://www.aceso.cz/inductotherm-group/vakuove-indukcni-taveni-%28vim%29.html>
- [16] LANGER, Emil a Jiří KOŽENÝ. *Elektrotepelná zařízení indukční*. 1. vyd. Plzeň, 1982, 185 s.
- [17] Hradílek, Z., Buchta, Z., Rusek, S., Gavlas, J. *Elektrotepelná zařízení*. IN-El, Praha 1997, 174 stran, ISBN 80-902333-2-5.
- [18] *North true vacuum: Silicon Carbide Vacuum Induction Furnace* [online]. c2017 [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: <http://www.sylvacuum.com/china/silicon-carbide-vacuum-induction-furnace>
- [19] *Incoil induction heating* [online]. c2016 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <http://www.incoil.cn/en/index.aspx>
- [20] *Induction heating equipment: Induction Heating Steel Pipe To Remove plastic coating* [online]. c2016 [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: [19] <https://www.dw-inductionheater.com/induction-heating-steel-pipe-to-remove-plastic-coating.html>
- [21] *Curved Stell Fencing* [online]. 2016 [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <https://www.cmrp.com/blog/bending/curving-at-wrigley-field.html>
- [22] *Wikipedie: Curieova teplota* [online]. 2017 [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Curieova_teplota
- [23] *Alutec: Hliníkový konstrukční systém & dopravníky* [online]. c2018 [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <https://www.aluteckk.cz/>
- [24] *ERIKSSON, F. Stepper Motor Basics* [online]. 1998. [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <http://solarbotics.net/library/pdflib/pdf/motorbas.pdf>
- [25] *Microstepping Tutorial. Zaber Technologies Inc.* [online]. 2014 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <http://www.zaber.com/>
- [26] *Arduino návody: Vývojové desky* [online]. 2016 [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: <http://navody.Arduino-shop.cz/zaciname-s-arduinem/vyvojove-desky.html>
- [27] *Hobby components forum: CNC V3.0 Arduino Compatible Shield* [online]. 2012 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://forum.hobbycomponents.com/viewtopic.php?f=40&t=1747>
- [28] *Procesní inženýrství III: Elektrické teplo* [online]. 2012 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/23955075-Procesni-inzenyrstvi-iii-elektricke-teplo.html>

- [29] *Induction heatings application: The processes, the equipment, the benefits* [online]. 2010 [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <http://www.efd-induction.com/~media/PDF/Applications/Applications.ashx>
- [30] *Robodoupě - web nejen o robotice: Krokové motory* [online]. 2013 [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/2013/krokove-motory-1-typy-motoru/>
- [31] *Robodoupě - web nejen o robotice: CNC jednoduše – 1. část: Co je Grbl?* [online]. 2013 [cit. 2018-03-23]. Dostupné z: [Robodoupě - web nejen o robotice](http://robodoupe.cz/2013/cnc-jednoduse-1-cast-co-je-grbl/)
- [32] *Allum: Elektromagnetická pole v domácnostech* [online]. 2013 [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: <http://www.allum.cz/toxicke-latky/elektromagneticka-pole-v-domacnostech>
- [33] *Ebay: 1000W ZVS Low voltage induction heating board module* [online]. 2017 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <https://www.ebay.com/itm/1000W-ZVS-Low-voltage-induction-heating-board-module-Tesla-coil-/111401314826>
- [34] *Apb bend: Heat bending* [online]. c2009 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: http://www.apb-bend.com/heat_bending.html
- [35] *Induction bending.* [online]. c2018 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <http://www.inductionbending.co.uk/>
- [36] *Dw induction heating.* [online]. c2016 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <https://www.dw-inductionheating.com/Applications/induction-bonding-23.html>
- [37] *Řídící jednotka souřadnicové frézky s krokovými motory.* Plzeň, 2014. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni Fakulta aplikovaných věd Katedra kybernetiky. Vedoucí práce Libor Jelínek.
- [38] *HOBBY CNC FRÉZKA.* Brno, 2015. Diplomová práce. VUT FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV AUTOMATIZACE A ŘÍZENÍ. Vedoucí práce TOMÁŠ MARADA.
- [39] *Katalog Alutec: Modul 45* [online]. c2017 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <https://katalog.aluteckk.cz/kategorie-produktu/modul-45/>
- [40] *Smartproxy: Nema 23 Stepper Motor Wiring Diagram* [online]. 2017 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <http://smartproxy.info/nema-23-stepper-motor-wiring-diagram/>
- [41] *PS electronic: ARDUINO UNO Rev3* [online]. 2015 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://www.pselectronic.cz/k5505-022-arduino-uno-rev3.html>
- [42] *Quasar electronics* [online]. c2018 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://quasarelectronics.co.uk/Item/arduino-uno-r3-controller>

- [43] *HobbyTronics: Drivers* [online]. c2018 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z:
<http://www.hobbytronics.co.uk/>
- [44] *Microsoft: Arduino IDE* [online]. c2018 [cit. 2018-03-31]. Dostupné z:
<https://www.microsoft.com/cs-cz/store/p/arduino-ide/9nblggh4rsd8>
- [45] *ShapeOko: Limit switch wiring* [online]. 2014 [cit. 2018-03-22]. Dostupné z:
<https://www.shapeoko.com/forum/viewtopic.php?f=4&t=1290&p=31052>
- [46] *Industruino: About industruino* [online]. 2018 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z:
<https://industruino.com/>

8 Seznam obrázků, tabulek a příloh

Seznam obrázků

Obrázek 1 Směr vířivých proudů vůči magnetickému toku [17]	5
Obrázek 2 Vliv frekvence na účinnost indukčního ohřevu	7
Obrázek 3 Možné tvary induktorů [7]	8
Obrázek 4 Popis uspořádání indukční kanálkové pece [1].....	10
Obrázek 5 Indukční pec se zakrytým kanálkem [29]	11
Obrázek 6 Indukční pec kelímková [1]	12
Obrázek 7 Indukční vakuová pec [18].....	13
Obrázek 8 Oblasti kalících teplot [6].....	14
Obrázek 9 Nákres indukčního pájení a ukázka pájení měděných profilů [1; 8].....	15
Obrázek 10 Princip indukčního svařování [10].....	16
Obrázek 11 Getrování výbojek [29].....	18
Obrázek 12 Indukční rovnání [19]	18
Obrázek 13 Indukční ohýbačka v praxi [21]	19
Obrázek 14 Odstranění plastu z povrchu kovu [20].....	20
Obrázek 15 CAD návrh konstrukce manipulátoru	21
Obrázek 16 Alutec profil 45 x 45 mm [39]	22
Obrázek 17 Konstrukce manipulátoru.....	23
Obrázek 18 Detail na lineární vedení pro osu Y v prvotní fázi stavby konstrukce.....	24
Obrázek 19 Typy KM motorů schematicky [24]	26
Obrázek 20 Popis zapojení KM [40]	27
Obrázek 21 Industruino [46].....	30
Obrázek 22 Vývojová deska Arduino Uno [41].....	31
Obrázek 23 CNC shield + 4x driver A4988 vs. driver TB66004A [42]	32
Obrázek 24 Krytí motoru a rozvodových kabelů	33
Obrázek 25 Popis pinů Arduino desky a driveru TB6600 [42].....	35
Obrázek 26 Schéma zapojení koncových spínačů dle logiky NC	36
Obrázek 27 Zapojení akčních členů skrze drivery k desce Arduino	36
Obrázek 28 Program Xloader [43]	38
Obrázek 29 Porovnání GUI Arduino IDE vs. GRBL Controller [44; 45].....	39
Obrázek 30 Control panel GUI [45].....	40
Obrázek 31 Online generátor G-kódu	42
Obrázek 32 Porovnání strojů pro indukční ohřev [33].....	42
Obrázek 33 Test gravírování do dřeva	43

Seznam tabulek

Tabulka 1 Currie teplota materiálů [22]	7
Tabulka 2 Doporučení kmitočty pro svařování ocelových trubek [9].....	16
Tabulka 3 Přehled technologií převodu pohonu.....	23
Tabulka 4 Parametry KM	25
Tabulka 5 Hodnoty proudu v jednotlivých fázích při použití mikro-krokování [25]	30
Tabulka 6 Přehled základních modelů Arduino [27].....	31
Tabulka 7 Základní moduly a shieldy vhodné pro stavbu strojů.....	32
Tabulka 8 Základní instrukce jazyka G [38]	41

Seznam příloh

Příloha 1 Detail spojení profilů společnosti Alutec KK [22]	53
Příloha 2 Osazení konstrukce lineárním vedením	53
Příloha 3 Čelní pohled na konstrukci osazenou KM	54
Příloha 4 Zapojování KM.....	55
Příloha 5 Zkušební zapojení KM.....	55
Příloha 6 Pohled na koš nesoucí elektroniku.....	56
Příloha 7 Detail zapojení bez koncových spínačů	56
Příloha 8 Kalibrace posuvů.....	57
Příloha 9 Finální kalibrace a kreslení textu	57
Příloha 10 Frézování do parkety.....	58
Příloha 11 Gravírování do dřeva	58

9 Seznam zkratek a symbolů

Seznam zratek

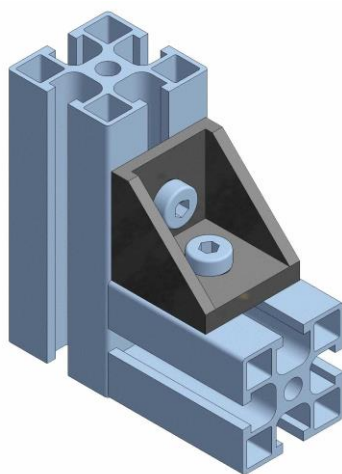
KM	Krokový motor
I/O	Input/Output, Vstup/Výstup
MCU	Micro Controller Unit, Mikropočítač
IDE	Integrated Development Enviroment, Integrované vývojové prostředí
HW	Hardware, Technické vybavení
SW	Software, Programové vybavení
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, Elektronicky vymazatelná paměť pouze pro čtení
CAM	Computer Aided Manufacturing, Počítačová podpora obrábění
CAD	Computer Aided Design, Počítačem podporované projektování
USB	Universal Seríál Bus, Univerzální sériová sběrnice
NC	Normally Closed, Logika rozepínacího kontaktu
NO	Normally Open, Logika spínacího kontaktu
LED	Light Emitting Diode, Elektroluminescenční diode
TX	Transmit, Vysílání signálů
RX	Receive, Přijímání signálů
PLC	Programmable Logic Controller, Programovatelný logický automat
CNC	Computer Numerical Control, Počítačem řízený stroj
PC	Personal computer, Osobní počítač

Seznam symbolů

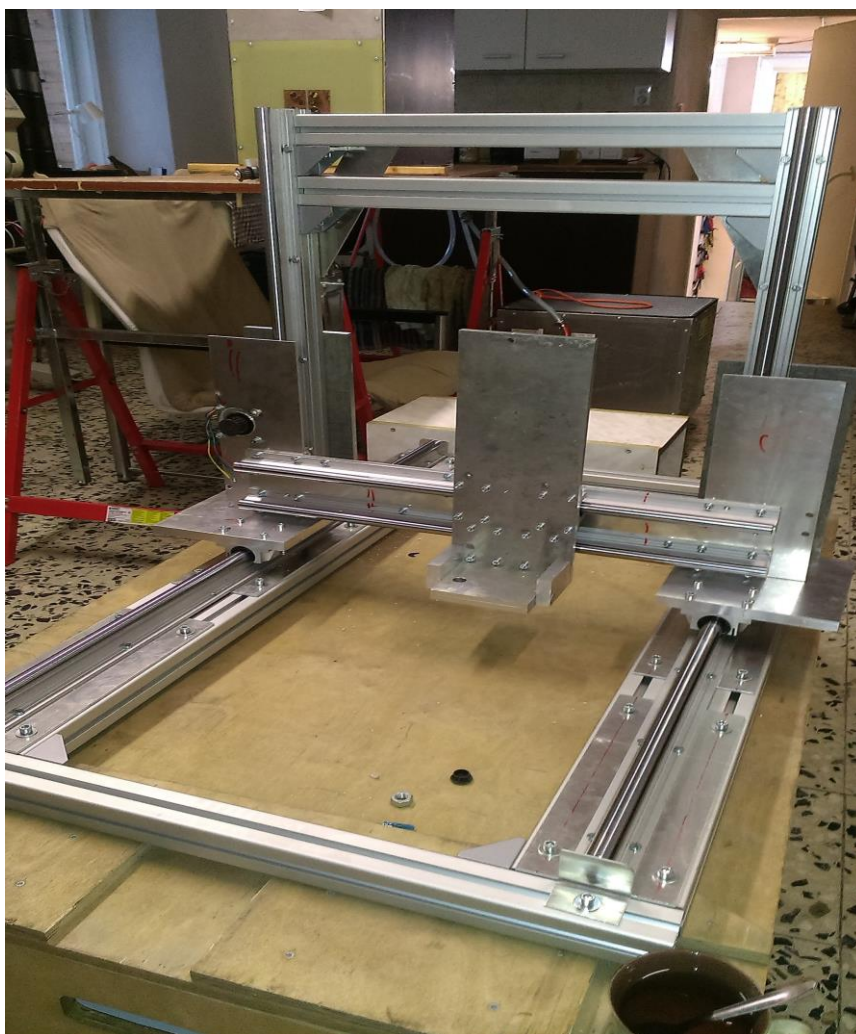
π	Matematická konstanta (-)
ρ	Elektrická rezistivita (Ω)
f	Frekvence / kmitočet (Hz)
U	Elektrické napětí (V)
I	Elektrický proud (A)
α	Jmenovitý úhel ($^\circ$)
Φ	Magnetický tok (Wb)
φ	Úhel pootočení ($^\circ$)
μr	Permeabilita (Hm^{-1} nebo NA^{-2})

10 Přílohy

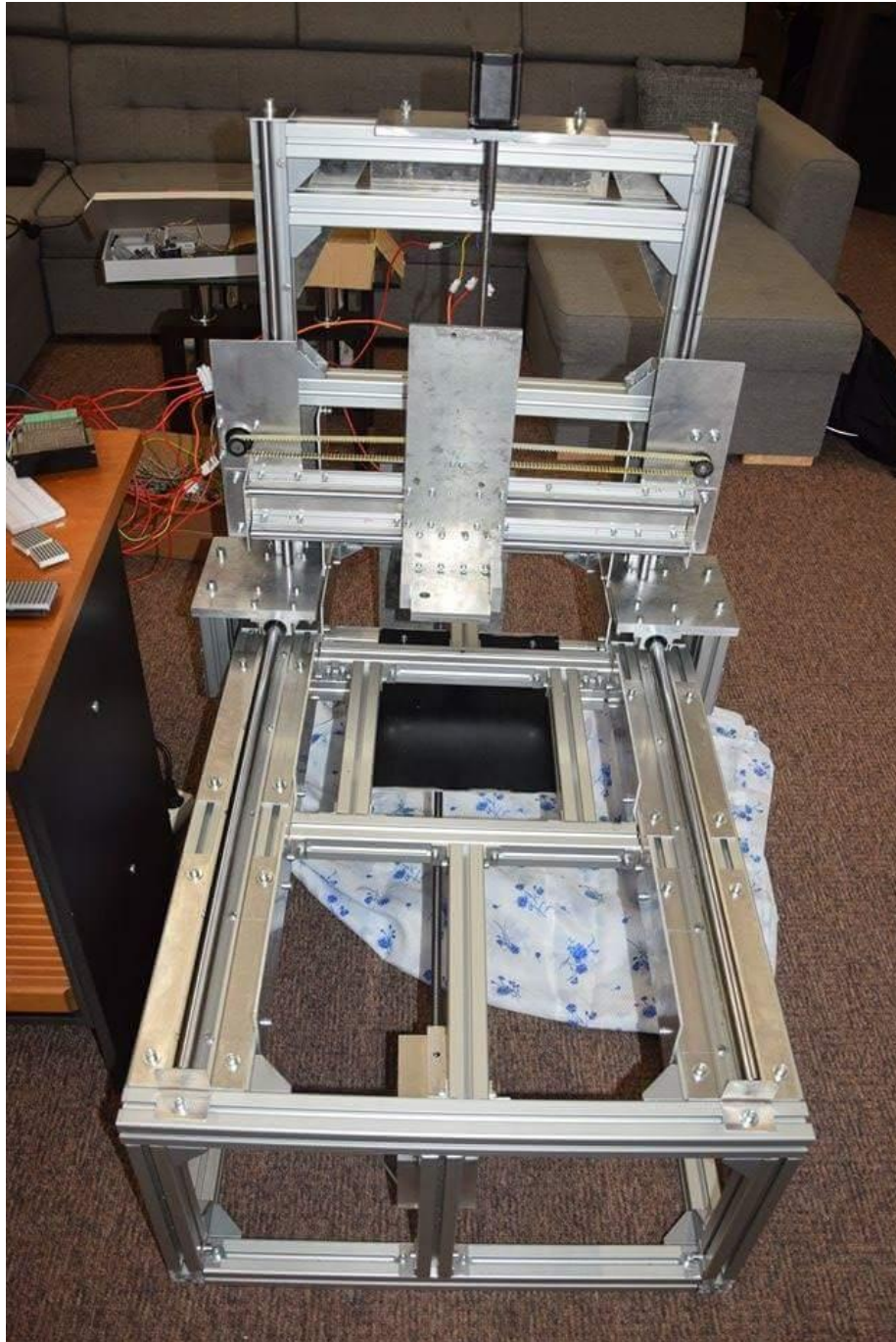
Příloha 1 Detail spojení profilů společnosti Alutec KK [22]



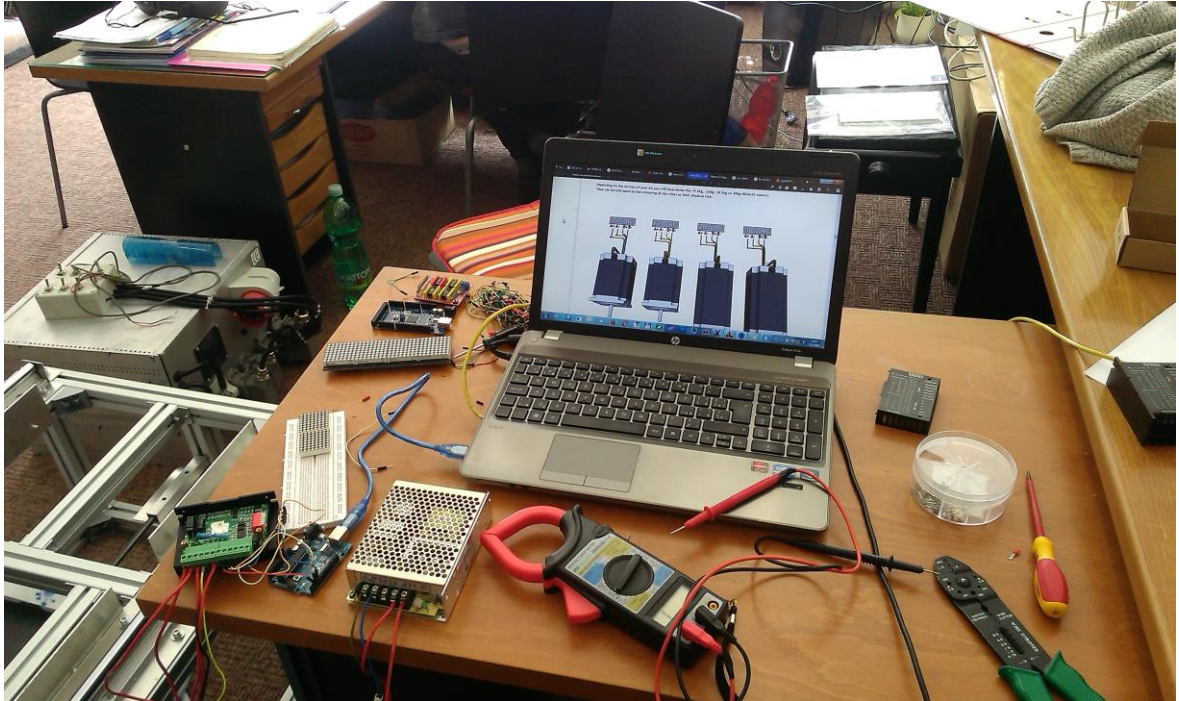
Příloha 2 Osazení konstrukce lineárním vedením



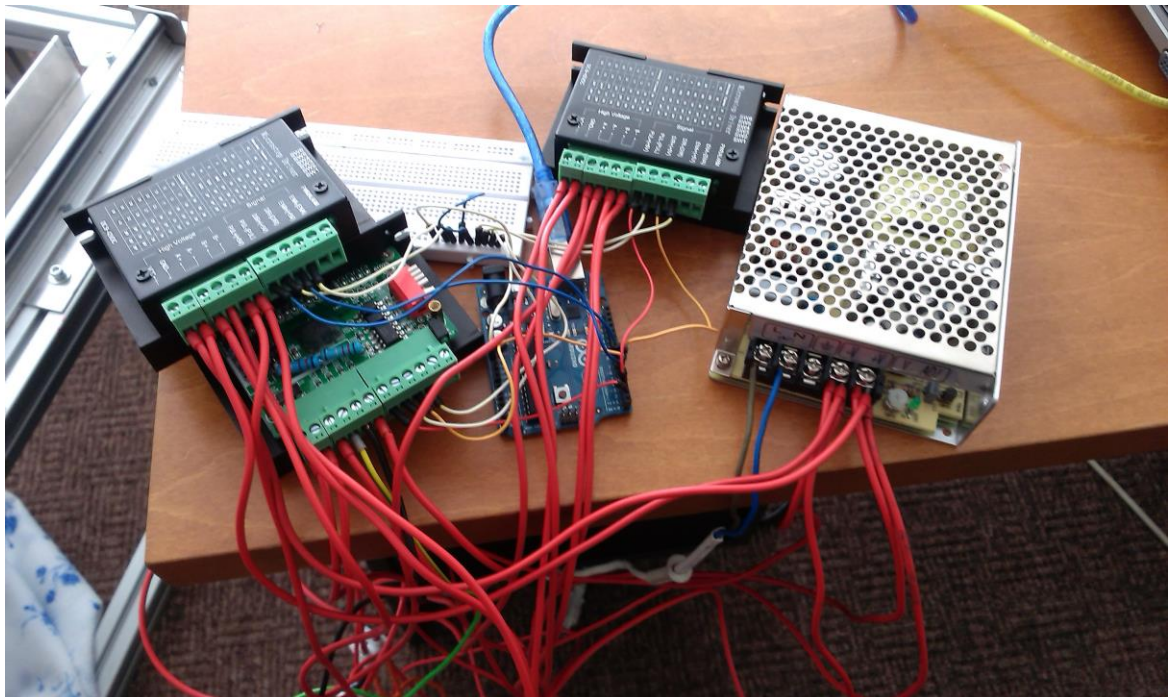
Příloha 3 Čelní pohled na konstrukci osazenou KM



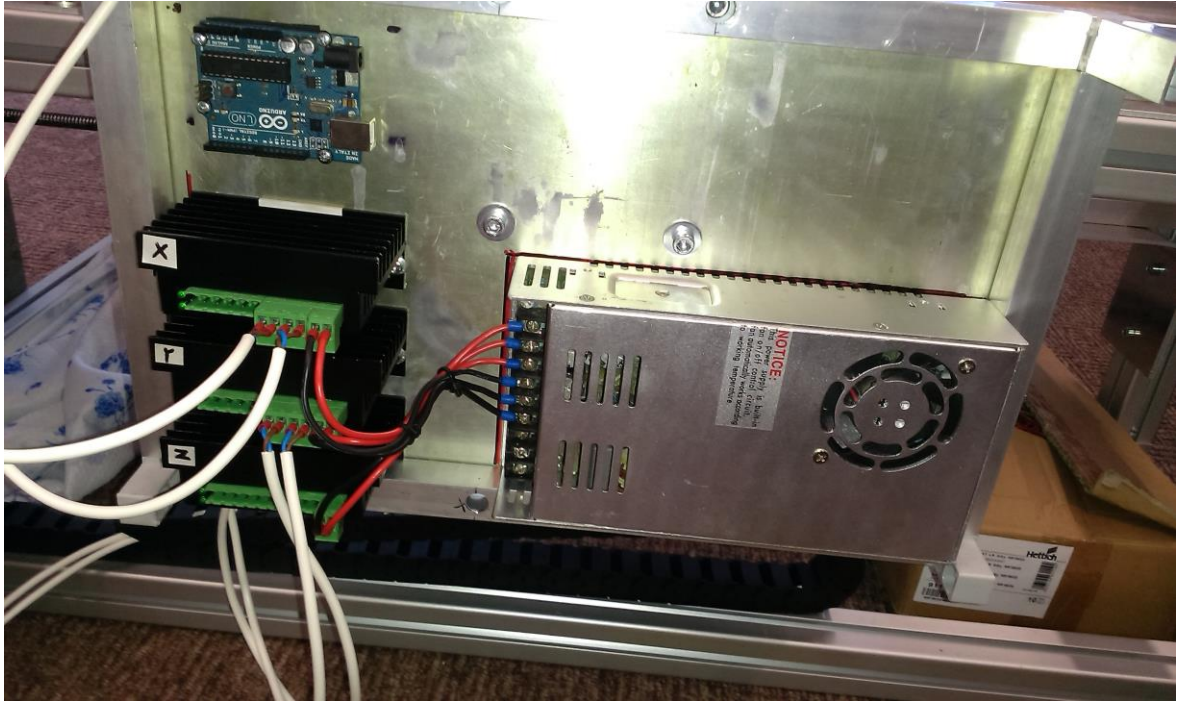
Příloha 4 Zapojování KM



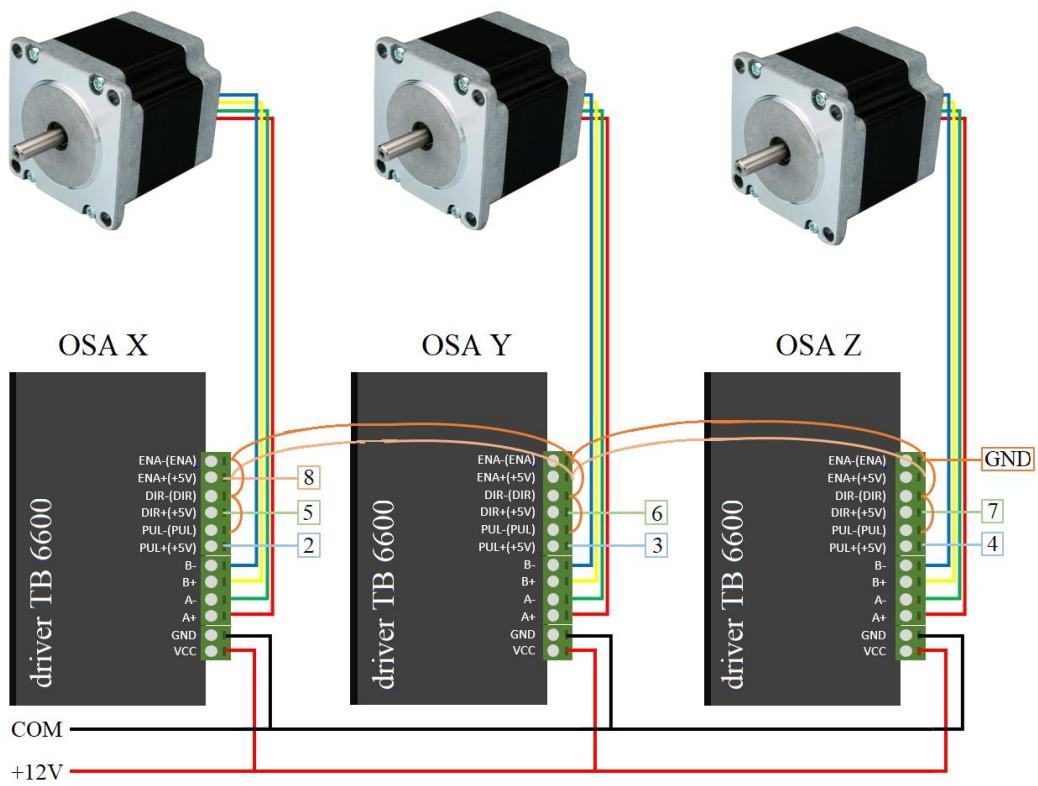
Příloha 5 Zkušební zapojení KM



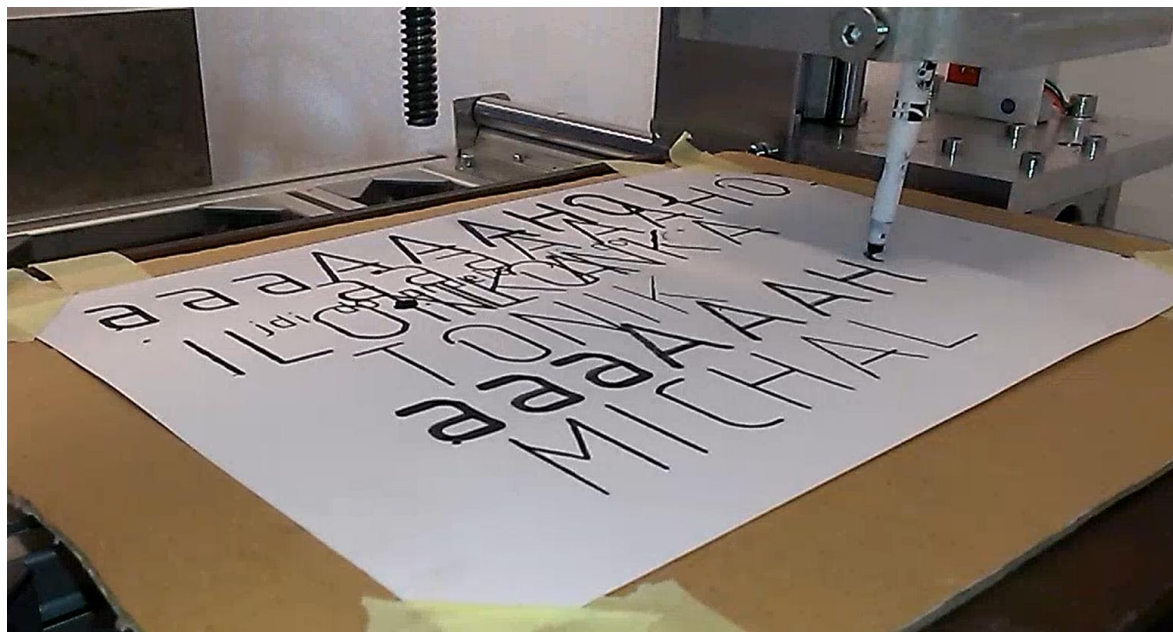
Příloha 6 Pohled na koš nesoucí elektroniku



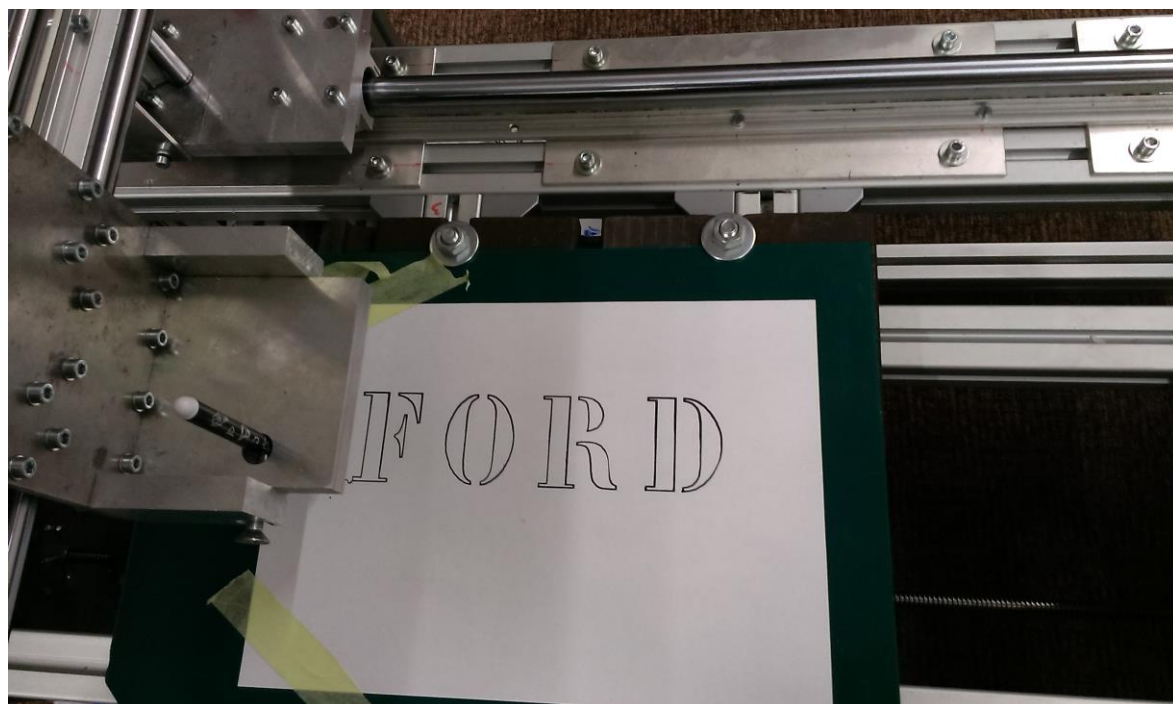
Příloha 7 Detail zapojení bez koncových spínačů



Příloha 8 Kalibrace posuvů



Příloha 9 Finální kalibrace a kreslení textu



Příloha 10 Frézování do parkety



Příloha 11 Gravírování do dřeva

